



Estimativa das emissões de gases com efeito de estufa
resultantes de fogos de vegetação em Portugal (1990 - 2008),
incluindo análise de incerteza e sensibilidade

Isabel Maria Duarte Rosa

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais

Orientador: Professor José Miguel Oliveira Cardoso Pereira

Co-orientador: Engenheiro Tiago Louro Bonifácio Pereira da Silva

Júri:

Presidente - Doutor João Manuel Dias dos Santos Pereira, Professor Catedrático do Instituto de
Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais - Doutor José Miguel Oliveira Cardoso Pereira, Professor Catedrático do Instituto
Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

- Doutor João Manuel das Neves Silva, Investigador Auxiliar do Instituto Superior
de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

- Engenheiro Tiago Louro Bonifácio Pereira da Silva, co-orientador, na qualidade de
especialista.

Lisboa, 2009

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível, sem a ajuda e colaboração de diversas pessoas, às quais gostaria de agradecer.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Cardoso Pereira, pela amizade e pelo empenho e dedicação demonstrados ao longo de toda a realização desta tese, bem como pelo conhecimento científico transmitido.

Quero agradecer ao Dr. Stefano Tarantola, do Joint Research Centre, pelo importante contributo dado para a realização da análise de sensibilidade e pela disponibilidade em me receber e esclarecer todas as dúvidas associadas.

Quero também agradecer ao meu co-orientador, Eng. Tiago Pereira da Silva, pelo esclarecimento de todas as dúvidas e pelo seu contributo.

À Professora Margarida Tomé, ao Professor José Tomé e à Sónia Faias, pelos dados fornecidos (Inventário Florestal e equações de biomassa) e esclarecimentos prestados.

À Professora Madalena Barreira pela importante ajuda nos ajustamentos estatísticos.

Aos meus colegas e amigos com que todos os dias partilho o Laboratório de Detecção Remota e Análise Geográfica, no Departamento de Engenharia Florestal, pelo bom ambiente de trabalho que proporcionam: Ana Sá, Ana Barros, Sofia, Filipa, Patrícia, Yannick e Bernardo.

Aos meus familiares e amigos, que estando perto ou longe, são sempre um enorme apoio. Por fim, um agradecimento muito especial ao João, por estar sempre ao meu lado.

Resumo

Os fogos de vegetação são uma importante fonte de emissão de gases com efeito de estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), sendo essencial conhecer e reduzir as incertezas associadas à estimativa destas emissões.

A análise de incerteza permite avaliar a variabilidade do resultado do modelo que está associada às incertezas inerentes a cada uma das variáveis, utilizadas no cálculo das emissões: área ardida, biomassa, factor de combustão e factor de emissão.

Em Portugal, a variabilidade anual observada é grande. Entre 1990 e 2008, o ano de 2003 registou a maior quantidade de gases emitidos, com o CO_2 como gás emitido em maior quantidade (cerca de 5000Gg). Importa realçar que também foram emitidas quantidades significativas de CH_4 e N_2O (311 e 258Gg $\text{CO}_{2\text{eq.}}$, respectivamente), que são gases com um potencial de efeito de estufa muito maior que o do CO_2 . Em 2008, pelo contrário, registaram-se os valores mais baixos de emissões, devido à pequena extensão de área ardida.

A análise de sensibilidade permitiu identificar o factor de emissão para cada composto químico e o factor de combustão da vegetação arbustiva, como as variáveis com maior efeito sobre a variância do resultado do modelo.

Palavras-chave: incêndios, gases com efeito de estufa, análise de incerteza e sensibilidade.

Abstract

Vegetation fires are an important source of greenhouse gases emissions to the atmosphere, such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrogen dioxide (N₂O). In order to improve our knowledge on how these gases affect the atmosphere, it is of utmost importance to identify and reduce the uncertainties attached to emissions estimation.

Each one of the variables used to calculate the emissions (burnt area, biomass, combustion factor and emission factor) have uncertainties associated with estimation of their values. The uncertainty analysis helps us to understand the variability of the model output.

In Portugal, within the large annual variability, between 1990 and 2008, 2003 was the year with the highest amount of greenhouse gases emitted. CO₂ was the gas with larger quantities emitted (roughly 5000Gg), however significant amounts of CH₄ and N₂O, which have higher greenhouse effect potential, were also released (311 and 258Gg CO_{2eq.}).

Results of the sensitivity analysis allowed for the identification of emission factor and the combustion factor of shrubs as the variables with higher impact on the variance of the model output. Therefore, it is very important to reduce the uncertainties attached to these variables in order to reduce the variability of the model output.

Keyword: vegetation fires, greenhouse gases, uncertainty and sensitivity analysis.

Extended abstract

The Mediterranean region is highly affected by fires, especially during the summer, due to high temperatures and low precipitation. These vegetation fires are an important source of greenhouse gas (GHG) emissions, such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrogen dioxide (N₂O). Besides these gases, vegetation fires also emit significant amounts of aerosols. Considering that these GHG and aerosols can have significant impacts on the local and global climate, it is of utmost importance to accurately quantify these emissions, for a better understanding of their potential effects on the atmosphere.

The model developed by Seiler and Crutzen (1980) is globally accepted to calculate the emissions of GHG and aerosols resulting from vegetation fires. This model estimates these emissions based on four variables: burnt area, biomass, combustion factor and emission factor. However, there are still important uncertainties associated with estimates of the values of these variables.

The present study is the first to use uncertainty and sensitivity analysis techniques to evaluate the variability of the results obtained with the Seiler and Crutzen model, and to identify the variables that causes the majority of this variability. This was done for years 1990 to 2008, and for different types of land cover in Portugal: forest, agriculture and shrublands.

The area burnt for each year and each land cover class was determined intersecting spatial information on land cover in Portugal and wildfires that occurred during the 19 years analysed here. The biomass for each class was estimated from different data sources: literature research, biomass equations (shrubs, leafs and fine branches) from the National Forest Inventory, shrub biomass and litter accumulation models. Information regarding combustion and emission factors is based only on literature research.

In order to perform an uncertainty analysis, which typically precedes a sensitivity analysis; it was first necessary to associate each variable with a measure of uncertainty, such as a probability distribution function. Then, a sample was created using the Sobol's sampling technique (Kucherenko, 2008). Although it works better for non-linear models than a simple random sampling technique, because it fully explores the inputs space, it has the disadvantage of high computational cost. Therefore, when evaluating the model interactively with the Monte Carlo technique, it was only possible to perform 256 evaluations.

Results of the uncertainty analyses for the entire time series revealed a very high annual variability which is, naturally, dependent on annual area burnt. Within this large annual variability, 2003 was the year with the highest amount of GHG and aerosols emitted. CO₂ was the gas with larger quantities emitted ($5070 \pm 1030\text{Gg}$). However, significant amounts of CH₄ and N₂O, which have higher potential for greenhouse effect, were also released (311 ± 139 and $258 \pm 84\text{Gg CO}_{2\text{eq.}}$ respectively). On the opposite side, 2008 was the year with the lowest emissions, registering only $143 \pm 29\text{Gg}$ of CO₂, $9 \pm 4\text{Gg CO}_{2\text{eq.}}$ of CH₄ and $7 \pm 2\text{Gg CO}_{2\text{eq.}}$ of N₂O emitted. These results are understandable, since these two years correspond to the highest and lowest area burnt in Portugal, between 1990 and 2008.

After evaluating the model and understanding the variability of the results, a sensitivity analysis was performed using a variance-based decomposition technique. The indices developed by Saltelli (2002), designated first and total order sensitivity indices, were determined for each year and each variable. The first order index represents the singular effect of each variable on the variance of the output of the model. The total order index provides information on interactions between variables and identifies unimportant ones. These two measures are model-independent, and are very helpful to establish research priorities for reducing uncertainties.

Results of the sensitivity analysis allowed for the identification of the emission factor of the chemical compound (for forests and shrubs), and the combustion factor of shrubs as the variables which have a higher impact on the variance of the model output. The single effects of these two variables together contribute to roughly 80-90% of the total variance. This means that the effect of the interactions between variables is very low, representing only 10-20% of the total variance. These results were similar for every year and every chemical compound under analysis. Therefore, it is very important to reduce the uncertainties attached to these variables, in order to reduce the variability of the model output and improve results.

Índice

Lista de figuras	i
Lista de Quadros	iii
1. Introdução	1
2. Caracterização da área de estudo	6
2.1 Temperatura	6
2.2 Precipitação	7
2.3 Ocupação do solo	9
3. Material e Métodos	14
3.1 Área ardida por classe de ocupação do solo	14
3.2 Biomassa presente nas diferentes classes de ocupação do solo	18
3.2.1 Florestas	18
3.2.1.1 Folhada	18
3.2.1.2 Arbustos	21
3.2.1.3 Copa – Folhas	22
3.2.1.4 Copa – Ramos finos	24
3.2.2 Matos	25
3.2.2.1 Arbustos	26
3.2.2.2 Folhada	28
3.2.3 Outras classes	29
3.3 Factores de combustão	30
3.4 Factores de emissão	32
3.5 Análise de incerteza e de sensibilidade	33

4. Resultados	37
4.1 Área ardida por classe de ocupação do solo	37
4.2 Biomassa	41
4.2.1 Floresta	41
4.2.2 Matos	42
4.3 Análise de incerteza e de sensibilidade	43
5. Discussão	50
5.1 Área ardida por classe de ocupação do solo	50
5.2 Biomassa no grupo Floresta	50
5.2.1 Biomassa arbustiva	50
5.2.2 Biomassa foliar e de ramos finos	52
5.3 Biomassa no grupo Matos	53
5.3.1 Biomassa arbustiva	53
5.3.2 Acumulação de folhada	54
5.4 Análise de incerteza e de sensibilidade	55
6. Conclusões	59
7. Referências bibliográficas	63
Anexos	71

Lista de figuras

Figura 1 – a) Temperatura média anual b) Temperatura mínima no Inverno (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) c) Temperatura máxima no Verão (Junho, Julho e Agosto), para o período entre 1961 e 1990	7
Figura 2 – Média da precipitação anual acumulada, para o período entre 1961 e 1990	8
Figura 3 – Média da precipitação sazonal acumulada: a) Inverno (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) b) Primavera (Março, Abril e Maio) c) Verão (Junho, Julho e Agosto) e d) Outono (Setembro, Outubro e Novembro), para o período entre 1961 e 1990	8
Figura 4 – Imagem MODIS da produtividade primária líquida na Península Ibérica	9
Figura 5 – Total de área ardida entre 1990 e 1999 e entre 2000 e 2008	10
Figura 6 – Mapas com a distribuição das cinco principais espécies florestais em Portugal, referentes aos anos de realização dos dois últimos IFN, 1995-1998 e 2005-2006.	11
Figura 7 – Mapa com a distribuição das culturas anuais e da vegetação arbustiva e herbácea	13
Figura 8 – Distribuição espacial das 638 folhas disponíveis da COS90	15
Figura 9 – Cruzamento entre os fotopontos do IFN0506 e as áreas de floresta do CORINE00. Pormenor de visualização na zona Norte de Portugal	16
Figura 10 – Exemplo da metodologia seguida para a determinação da área ardida por tipo de ocupação do solo	17
Figura 11 – Mapa com a ocupação arbustiva das regiões PROF (AML e AMP referem-se às áreas metropolitanas de Lisboa e do Porto, respectivamente)	28
Figura 12 – Comparação entre diferentes métodos de amostragem: regular, aleatória e de Sobol	35
Figura 13 – Total de área ardida no período compreendido entre 1990 e 2008, para as principais classes de ocupação do solo	37
Figura 14 – Total de área queimada agregadas as classes em Floresta, Culturas agrícolas e Vegetação arbustiva, para a década de 90 e para o segundo período	38

Figura 15 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de CO ₂ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008	45
Figura 16 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de N ₂ O resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008	45
Figura 17 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de CH ₄ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008	45
Figura 18 – Análise de sensibilidade das emissões de CO ₂ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008	46
Figura 19 – Análise de sensibilidade das emissões de N ₂ O resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008	47
Figura 20 – Análise de sensibilidade das emissões de CH ₄ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008	47
Figura 21 – Comparação das emissões de gases de efeito de estufa (CO ₂ , N ₂ O e CH ₄) de diferentes fontes, em Portugal, entre 1990 e 2007	57

Índice de Quadros

Quadro 1 – Acumulação de folhada ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) por tipo de ocupação florestal e respectiva fonte	19
Quadro 2 – Equações utilizadas para a determinação da biomassa foliar	23
Quadro 3 – Equações utilizadas no cálculo da biomassa de ramos finos	25
Quadro 4 – Parâmetros b e c, percentagem ocupada por matos e respectiva APL das 21 regiões PROF de Portugal	28
Quadro 5 – Descrição dos modelos de combustível utilizados	30
Quadro 6 – Intervalo de variação ou média do factor de combustão por componente de biomassa, incluindo a respectiva fonte	31
Quadro 7 – Factores de emissão (média (μ) e desvio padrão (σ)) dos diferentes compostos químicos ($\text{g} \cdot \text{Kg}^{-1}$): dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), total de hidrocarbonetos não metânicos (THNM), óxido nítrico (N_2O), óxidos de azoto (NO_x), material particulado de diâmetro inferior a $2,5\mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$), material particulado total (MPT), negro de fumo (NF) e carbono orgânico (C_{or})	33
Quadro 8 – Área ardida por classe de ocupação do solo entre 1990 e 1999	39
Quadro 9 – Área ardida por classe de ocupação do solo entre 2000 e 2008	40
Quadro 10 – Biomassa arbustiva presente nos povoamentos florestais	41
Quadro 11 – Biomassa foliar presente nos povoamentos florestais	41
Quadro 12 – Biomassa de ramos finos presente nos povoamentos florestais	42
Quadro 13 – Biomassa arbustiva, rácio de folhas, biomassa foliar, produção de folhada e acumulação de folhada para diferentes idades de vegetação	43
Quadro 14 – Variáveis ajustadas e respectivos parâmetros do ajustamento	44
Quadro 15 – Índices de sensibilidade (primeira ordem e totais) determinados para as emissões de CO_2 , em 1990	48

Quadro 16 – Potencial de aquecimento global dos três principais gases de efeito de estufa

56

1. Introdução

Sendo um país pertencente à região do Mediterrâneo, a ocorrência de fogos, em Portugal, deve ser encarada como um evento natural que faz parte das características dos ecossistemas desta região. A ocorrência do fogo está associada às características da vegetação, que nalguns casos está adaptada e depende deste para completar o seu ciclo de vida (Palacios-Orueta *et al.*, 2002), e do clima que se verifica nesta região. Contudo, ao longo do tempo, o Homem estabeleceu uma estreita relação com o fogo, utilizando-o para diversos fins, como nas actividades agro-pecuárias. Em Portugal, a maior parte dos fogos resulta, directa ou indirectamente, da actividade humana. Dos cinco principais países do Mediterrâneo (Portugal, Espanha, Itália, Grécia e França), Portugal, sendo o de menor dimensão, é aquele que tem sido mais afectado, nos últimos anos, pelos fogos rurais (Pereira *et al.*, 2006).

A área ardida anual é bastante variável e está dependente da precipitação registada no final da Primavera e da ocorrência de ondas de calor durante o Verão, sendo um pequeno número de incêndios de grandes dimensões responsáveis pela grande maioria da área queimada (Pereira *et al.*, 2006, Flannigan *et al.*, 2000). Verifica-se também elevada heterogeneidade geográfica nos fogos em Portugal, localizando-se grande parte da área queimada anualmente a Norte do Tejo, sobretudo na região Centro, onde o abandono rural tem levado à acumulação de grandes quantidades de combustível, bem como no Barlavento Algarvio (Pereira *et al.*, 2006). Nestas regiões, a ocorrência de incêndios está muito relacionada com uso do fogo como ferramenta nas actividades agrícolas, incluindo a pastorícia.

A queima de biomassa é um fenómeno global, que pode resultar tanto de processos naturais como antropogénicos (Innes, 2000), com maior expressão nas regiões tropicais, muito associada a práticas agrícolas, ao uso desta como fonte de energia e à substituição de florestas por culturas agrícolas (Andreae, 1991 e Crutzen e Lelieveld, 2001). Contudo, a ocorrência de grandes incêndios noutras regiões do globo, como o Mediterrâneo, leva à libertação de quantidades significativas de gases com efeito de estufa e aerossóis para a atmosfera, que poderão ter impactos significativos tanto no clima regional como global (Leenhouts *et al.*, 1998).

Langmann *et al.* (2009) referem que a maior parte do carbono emitido é na forma de CO₂ e CO, representando entre cerca de 90 a 95% das emissões. No entanto a quantidade emitida de cada gás vai depender do tipo de combustível e das condições em que se dá a combustão. Se a combustão for completa, os produtos libertados como resultado da queima de biomassa são o dióxido de carbono (CO₂) e o vapor de água (H₂O). Contudo, na maior parte das vezes, a

combustão não chega a ser completa por falta de oxigénio (Andreae, 1991), levando à libertação de outros compostos como o monóxido de carbono (CO), o óxido nitroso (N₂O), outros óxidos de azoto (NO_x), metano (CH₄), outros compostos de carbono e material particulado.

A importância da queima de biomassa como fonte de gases poluentes foi pela primeira vez reconhecida no final da década de 70, por Crutzen *et al.* (1979). Os autores revelaram o impacto significativo que determinados gases libertados durante um incêndio poderiam ter na atmosfera, como por exemplo, a libertação de CO₂, N₂O e CH₄, como gases que contribuem para o efeito de estufa. No ano seguinte, Seiler e Crutzen (1980) propuseram o modelo que até hoje é, globalmente, utilizado no cálculo das emissões de compostos químicos resultantes dos fogos de vegetação.

Estimar correctamente a quantidade de gases libertada durante a queima de biomassa é um desafio e uma tarefa difícil devido ao elevado número de variáveis que estão envolvidas no processo (Palacios-Orueta *et al.*, 2005), bem como devido à grande heterogeneidade espacial e temporal dos fogos e à grande diversidade de vegetação (Chen *et al.*, 2009, Palacios-Orueta *et al.*, 2002).

Este é, portanto, um tema que tem ganho uma importância crescente ao longo dos últimos anos, aparecendo numerosos estudos sobre as emissões resultantes da queima de biomassa, não só à escala global (e.g. Langmann *et al.*, 2009 e van der Werf *et al.*, 2006), como à escala continental (e.g. Barbosa *et al.*, 1999 e Lehsten *et al.*, 2009), à escala regional (e.g. Cinnirella *et al.*, 2007, Scholes, 1995 e Conrad *et al.*, 2002), à escala nacional (e.g. Liu, 2004, Leenhouts, 1998, Silva *et al.*, 2006 e Amiro *et al.*, 2001), ou até à escala de um único fogo de grandes dimensões (Campbell *et al.*, 2007).

Assim sendo, à escala global, van der Werf *et al.* (2006) avaliaram a variabilidade inter-anual nas emissões resultantes da queima de biomassa. Para tal, recorreram a informação sobre as áreas ardidas (obtidas por classificação de imagens de satélite), acumulação de combustível (dado pela produtividade primária líquida), factor de combustão (rácio entre o combustível consumido e o total disponível) e factor de emissão. É feita referência, neste estudo, às incertezas que rodeiam estas estimativas e a dificuldade em quantificá-las. Também Langamann *et al.* (2009), referem que apesar de terem existido melhorias significativas no inventário das emissões, continuam a persistir incertezas, devido à variabilidade espacial e temporal dos fogos e, atribuem ao factor de emissão, uma incerteza entre os 20 e 30%.

Os estudos à escala continental centram-se, sobretudo, no continente africano o que se percebe facilmente, uma vez que este representa cerca de 60% das emissões a nível global (van der Werf *et al.*, 2006). Lehsten *et al.* (2009) estimaram as emissões neste continente, investigando a variabilidade inter-anual e a sua relação com as condições climáticas e a produtividade da vegetação. Barbosa *et al.* (1999) já tinham estudado as emissões resultantes dos fogos de vegetação neste continente, referindo a necessidade de reduzir as incertezas, sobretudo relacionadas com as áreas ardidas. Neste aspecto, Portugal é o país europeu com a melhor informação cartográfica (Pereira *et al.*, 2006), tendo uma série de mais de 30 anos (desde 1975) de fogos caracterizados com elevada resolução espacial. Como tal, as maiores incertezas nas estimativas não deverão ser as associadas a esta variável.

À escala nacional existem vários estudos, nos Estados Unidos da América Liu (2004) deu a conhecer a variabilidade anual das emissões resultantes tanto de fogos naturais como de fogos controlados. Revelou a existência de uma forte sazonalidade e relacionou-a com as condições climáticas (temperatura e precipitação), sendo que a períodos mais secos e quentes corresponde maior quantidade de emissões. Uma vez mais, são referidas as incertezas, sobretudo ao nível da acumulação de combustível e dos factores de emissão. No Canadá, segundo Amiro *et al.* (2001), as emissões resultantes dos fogos florestais representam cerca de 18% das emissões do sector energético. Sendo libertado sobretudo CO₂, mas também outros gases como o N₂O e o CH₄, que podem ser emitidos em quantidades mais pequenas. O autor afirma ainda que estes gases poderão influenciar o clima tanto a nível regional como global, por terem efeito de estufa.

Para Portugal, Silva (2004) apresentou um estudo sobre as emissões de gases com efeito de estufa resultante dos fogos rurais, na década de 90. A metodologia seguida é semelhante àquela que vai ser descrita nesta tese, uma vez que este trabalho serviu de ponto de partida para aquilo a que se propõe esta tese. As dificuldades encontradas pelo autor e as incertezas que assume na determinação das variáveis, serviu de incentivo à realização de uma análise de incerteza e de sensibilidade, para conhecer melhor a variabilidade associada ao resultado do modelo aplicado e, posteriormente, identificar que variáveis poderão estar a contribuir com maior peso para tal.

Conhecer e quantificar correctamente as emissões resultantes dos incêndios é muito importante para estudos sobre o clima da Terra (Hodzic *et al.*, 2007), uma vez que, como já foi referido anteriormente, são libertadas quantidades significativas de gases com efeito de estufa e aerossóis. É reconhecido o impacto que os grandes fogos podem ter na atmosfera e no clima

(Simmonds *et al.*, 2005, Hodzic *et al.*, 2007): por um lado a libertação de gases com efeito de estufa que, como se sabe, impedem que a radiação térmica emitida pela Terra saia para o espaço, podendo provocar um aumento global da temperatura; por outro os aerossóis emitidos podem absorver ou reflectir a radiação solar (dependo das características das partículas, este é o chamado efeito directo) e modificar as propriedades das nuvens (chamado efeito indirecto), influenciando o ciclo hidrológico (Kaufman *et al.*, 2002, Langmann *et al.*, 2009). O efeito conjugado destes dois agentes é uma alteração do balanço radiativo da Terra, ou seja, uma alteração na radiação solar que é recebida ou reflectida e da radiação térmica que é emitida (Kaufman *et al.*, 2002). Importa também realçar que, para além dos efeitos sobre a atmosfera, também se pode assistir a uma degradação da qualidade do ar, podendo provocar problemas na saúde humana e animal, devido às partículas em suspensão (Pio *et al.*, 2006).

O efeito directo dos aerossóis pode explicar, em parte, porque é que a Terra não tem aquecido tanto com o aumento da concentração dos gases com efeito de estufa na atmosfera. É que os aerossóis podem reflectir a radiação solar, aumentando o albedo planetário e arrefecendo a superfície da Terra. Contudo, não se sabe ao certo qual o efeito líquido da emissão dos aerossóis, uma vez que também são libertadas partículas com poder de absorção da radiação solar tendo, por isso, efeito oposto ao que atrás foi descrito (Haywood e Boucher, 2000). O efeito indirecto poderá ter implicações no ciclo hidrológico, uma vez que um excesso de partículas na atmosfera, que funcionam como núcleos de condensação das nuvens, poderá alterar as propriedades das mesmas e, consequentemente, a precipitação (Lohmann e Feichter, 2005).

Os grandes incêndios podem emitir quantidades elevadíssimas de CO₂ para a atmosfera (Wiedinmyer e Neff, 2007). Contudo, o verdadeiro impacto destas emissões na atmosfera só pode ser devidamente estudado com uma correcta estimativa das emissões. A incerteza que rodeia a quantificação das emissões continua a ser um obstáculo ao estudo dos seus efeitos na atmosfera (Menon, 2004). Apesar da existência de muitas incertezas, associadas à estimativa das emissões resultantes dos fogos de vegetação, ser reconhecida em diversos estudos, como aqueles que foram acima referidos, nunca foi feito um investimento no sentido de conhecer a fundo o modo como essas incertezas influenciam a variabilidade do resultado do modelo. Também nunca se tentou investigar a fundo quais as variáveis responsáveis por essa variabilidade.

Existe um estudo (Korontzi *et al.*, 2004) onde se fala da realização de uma análise de sensibilidade feita às emissões resultantes dos fogos no Sul de África. Contudo, é bem

diferente do conceito de análise de sensibilidade que se utiliza nesta tese. Enquanto aqui se fala em identificar as variáveis que mais contribuem para a variabilidade do resultado do modelo e se fala em índices que permitem quantificar esse efeito, no estudo referido, a análise é feita apenas modificando a forma como se determinam as áreas ardidas. Ou seja, as emissões são estimadas com base em dois conjuntos de dados de áreas queimadas e os autores tentam perceber apenas a sensibilidade das estimativas à forma como são determinadas as áreas queimadas.

A utilização de técnicas de análise de incerteza, fazendo avaliações iterativas do modelo, permite quantificar a variabilidade do resultado do modelo que é devida às incertezas associadas a cada uma das variáveis (Crosetto *et al.*, 2000). Como tal, o resultado não é apenas um número, mas sim uma função de densidade de probabilidade, que contém muito mais informação do que um intervalo de valores.

A análise de sensibilidade permite identificar quais as variáveis que provocam maior variância no resultado do modelo (Crosetto *et al.*, 2000 e Kioutsioukis *et al.*, 2004) e quantificar esse efeito, com base em índices.

Este trabalho teve como objectivos dar continuidade ao estudo iniciado por Silva (2004), actualizando as estimativas feitas por este autor, não só alargando o período de análise em mais 9 anos, como utilizando, sempre que possível, informação mais recente e completa para as variáveis em estudo. Por outro lado, pretendeu-se fazer a primeira análise da incerteza associada aos resultados obtidos pelo modelo aplicado e também a primeira análise de sensibilidade, tentando perceber quais os parâmetros que mais contribuíram para a incerteza dos resultados.

Na próxima secção faz-se uma breve caracterização da área de estudo, depois, na secção seguinte, é explicada a metodologia adoptada nesta tese, em seguida apresentam-se os resultados obtidos e, por fim, discutem-se os resultados e apresentam-se as principais conclusões deste estudo.

2. Caracterização da área de estudo

Nesta secção pretende-se fazer uma breve caracterização da área de estudo desta tese – Portugal Continental – focando aspectos que, directa ou indirectamente, estão relacionados com a ocorrência do fogo, como o clima (temperatura e precipitação) e a ocupação do solo. Embora não sendo um país de grandes dimensões (cerca de 8.900.000ha), observa-se uma grande variabilidade espacial, em termos climáticos e de ocupação do solo, ao longo do mesmo.

Portugal Continental localiza-se entre as latitudes de 37°N e 42°N e as longitudes de 9,5°W e 6,5°W (Miranda *et al.*, 2006), aproximadamente, inserindo-se na região Mediterrânica, que é caracterizada pelos Verões quentes e secos e por Invernos mais chuvosos e frios (Joffre e Rambal, 2002).

2.1 Temperatura

A temperatura do ar é influenciada, principalmente, pela proximidade da costa, a latitude e a altitude (Miranda *et al.*, 2006). As regiões a Sul do Tejo (particularmente, o Alentejo e o Algarve) registam os valores mais elevados de temperatura média anual, enquanto a região Norte de Portugal regista os valores mais baixos (Fig. 1a).

A temperatura média mensal varia ao longo do ano, atingindo o mínimo em Janeiro, particularmente nas regiões montanhosas do Centro, e o máximo no mês de Agosto, no Litoral Sul (Miranda *et al.*, 2006).

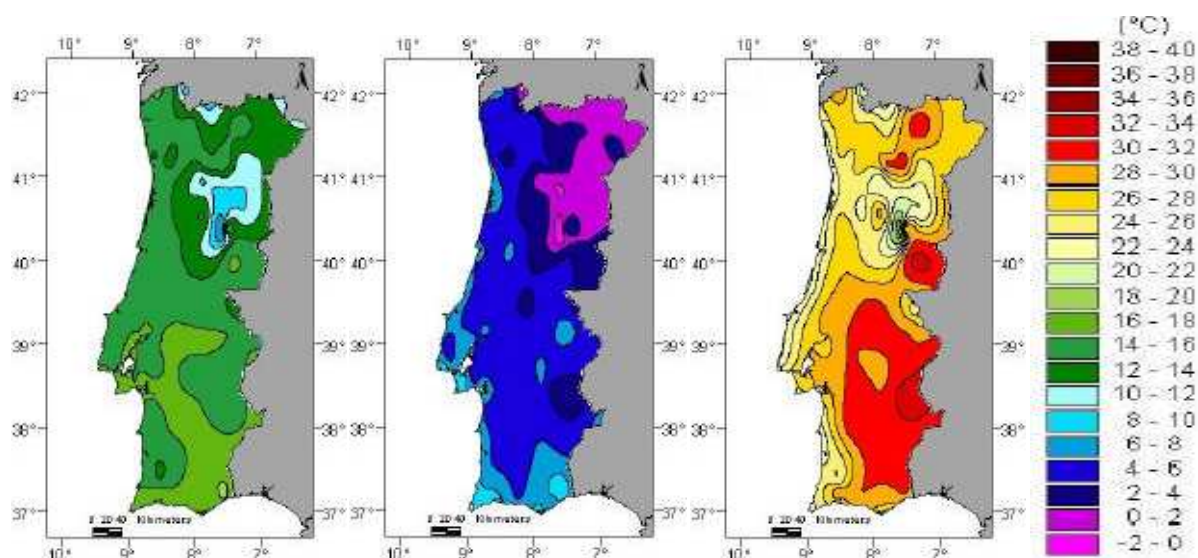


Figura 1 – a) Temperatura média anual b) Temperatura mínima no Inverno (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) c) Temperatura máxima no Verão (Junho, Julho e Agosto), para o período entre 1961 e 1990 (fonte: Miranda *et al.*, 2006).

Embora as temperaturas na região Sul do país sejam muito elevadas, no Verão, nomeadamente na região do Alentejo (Fig. 1c), esta não é uma região fortemente afectada pelos incêndios. Tal fica a dever-se à escassez de combustível disponível, devido ao tipo de ocupação do solo característico desta região, sendo essencialmente culturas agrícolas.

2.2 Precipitação

Em relação à precipitação, regista-se em Portugal uma média anual de 900mm, mas existe também uma grande variabilidade espacial (Miranda *et al.*, 2006), com a região Noroeste do país a registar valores mais elevados de precipitação média anual, do que as regiões mais a Sul e no Interior (Fig. 2).

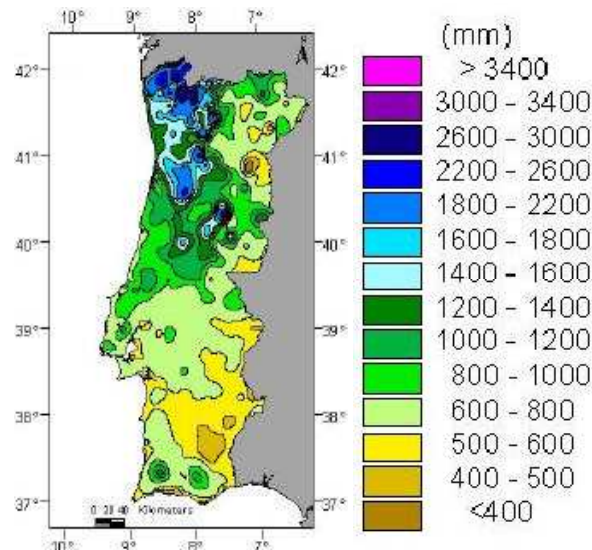


Figura 2 – Média da precipitação anual acumulada, para o período entre 1961 e 1990 (fonte: Miranda *et al.*, 2006).

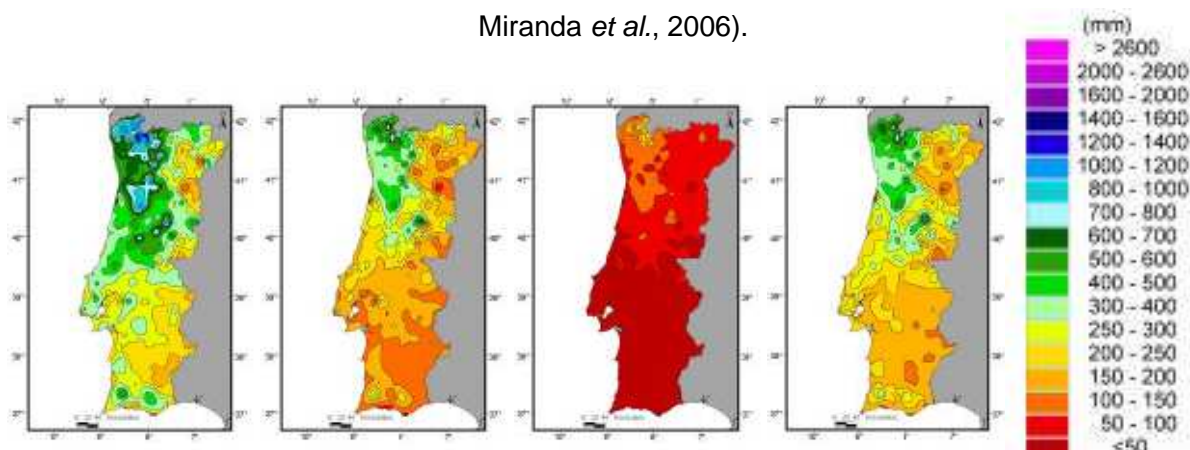


Figura 3 – Média da precipitação sazonal acumulada: **a)** Inverno (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) **b)** Primavera (Março, Abril e Maio) **c)** Verão (Junho, Julho e Agosto) e **d)** Outono (Setembro, Outubro e Novembro), para o período entre 1961 e 1990 (fonte: Miranda *et al.*, 2006).

Como no Inverno e na Primavera, normalmente, chove mais nas regiões Norte e Centro de Portugal (Fig. 3a, b e d), permite que haja uma maior acumulação de vegetação nestas regiões, chegando ao Verão (estação mais quente e seca, Fig 3c) com quantidades significativas de combustível disponível para arder.

2.4 Ocupação do Solo

A ocupação do solo desempenha, a par com o clima, um papel fundamental na distribuição dos fogos em Portugal. A sazonalidade da temperatura do ar e da precipitação tem consequências desenvolvimento da vegetação, limitando o seu período de crescimento aos meses mais húmidos do ano, entre o Outono e a Primavera (Joffre e Rambal, 2002).

É interessante observar a distribuição das zonas de maior produtividade primária líquida (PPL) em Portugal (Fig. 4), e perceber que estas se localizam na região Sul (mais concretamente no Algarve), no Litoral e no Centro Norte. Exceptuando o Litoral, onde se concentram sobretudo as grandes áreas urbanas e onde existe pouca área susceptível de arder, é precisamente no Centro Norte e no Algarve que ocorrem os grandes incêndios (Fig. 5). Estas são regiões onde existem muitos terrenos florestais e agrícolas abandonados, que criam condições para a acumulação de grandes quantidades de combustível.

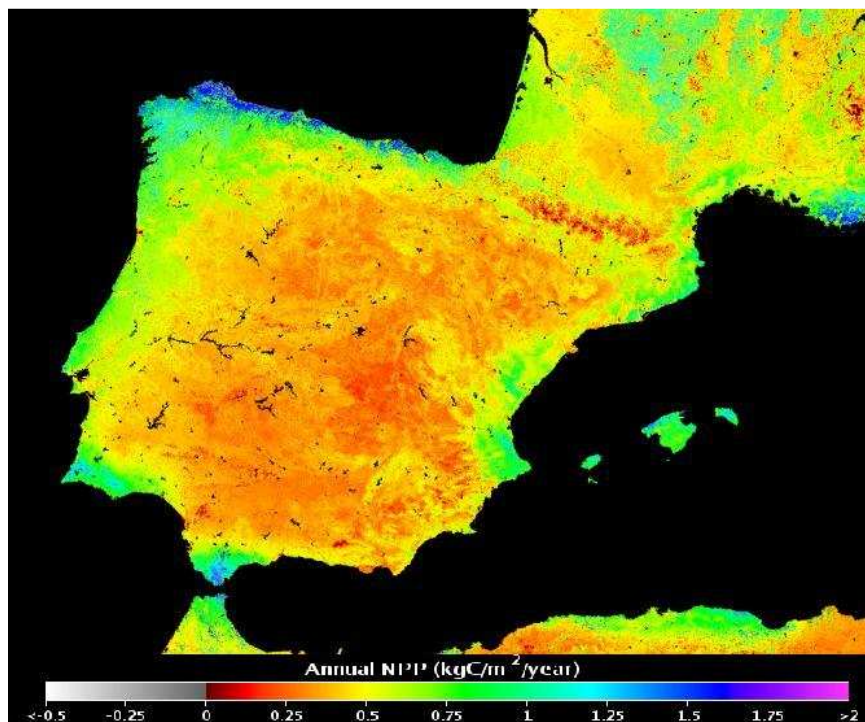


Figura 4 – Imagem *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* da produtividade primária líquida na Península Ibérica, em 2003 (fonte: Numerical terradynamic simulation group, <http://images.ntsg.umd.edu/searchresults.php?where=Browse&crd=11&showThumbs=on&limit=10>).

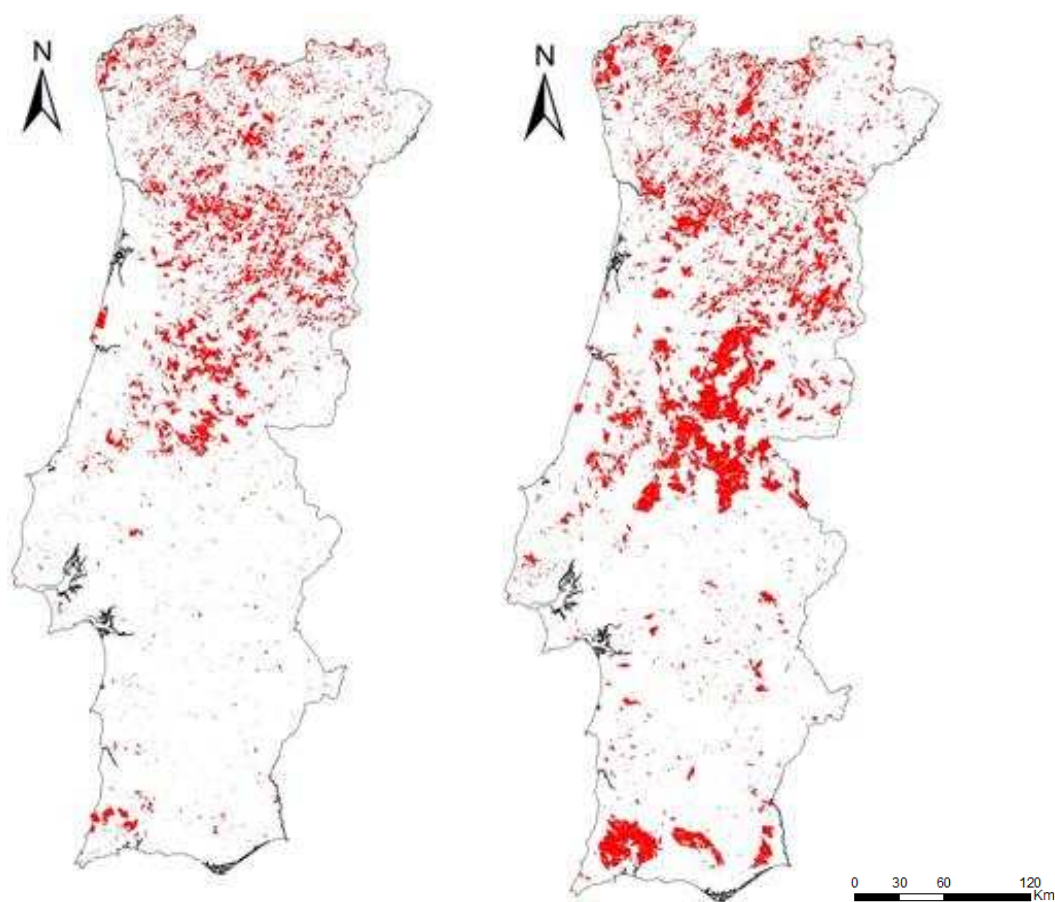


Figura 5 – Total de área ardida entre 1990 e 1999 (esquerda) e entre 2000 e 2008 (direita) (fonte: cartografia feita no Departamento de Engenharia Florestal, do Instituto Superior de Agronomia).

Repare-se também no grande número de fogos que ocorrem no Norte do país. Embora o número seja grande, a dimensão dos mesmos é muitas vezes pequena, pois estão ligados à utilização do fogo como instrumento de gestão das culturas agrícolas.

Este estudo centra-se, não só nas áreas florestais que representam cerca de 38% da área de Portugal Continental, como também nas áreas de culturas agrícolas (cerca de 34%) e zonas de matos (cerca de 21%) (DGRF, 2007).

Em Portugal existem três espécies que ocupam a maior parte da área florestal (Fig.6): Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), concentrado mais no Litoral Centro, Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), na região Centro do país, e Sobreiro (*Quercus suber*), mais característico da paisagem Alentejana. Contudo, a diversidade de espécies é grande e pode ainda encontrar-se Pinheiro manso (*Pinus pinea*), Azinheira (*Quercus ilex*), Castanheiro (*Castanea sativa*), entre muitas outras.

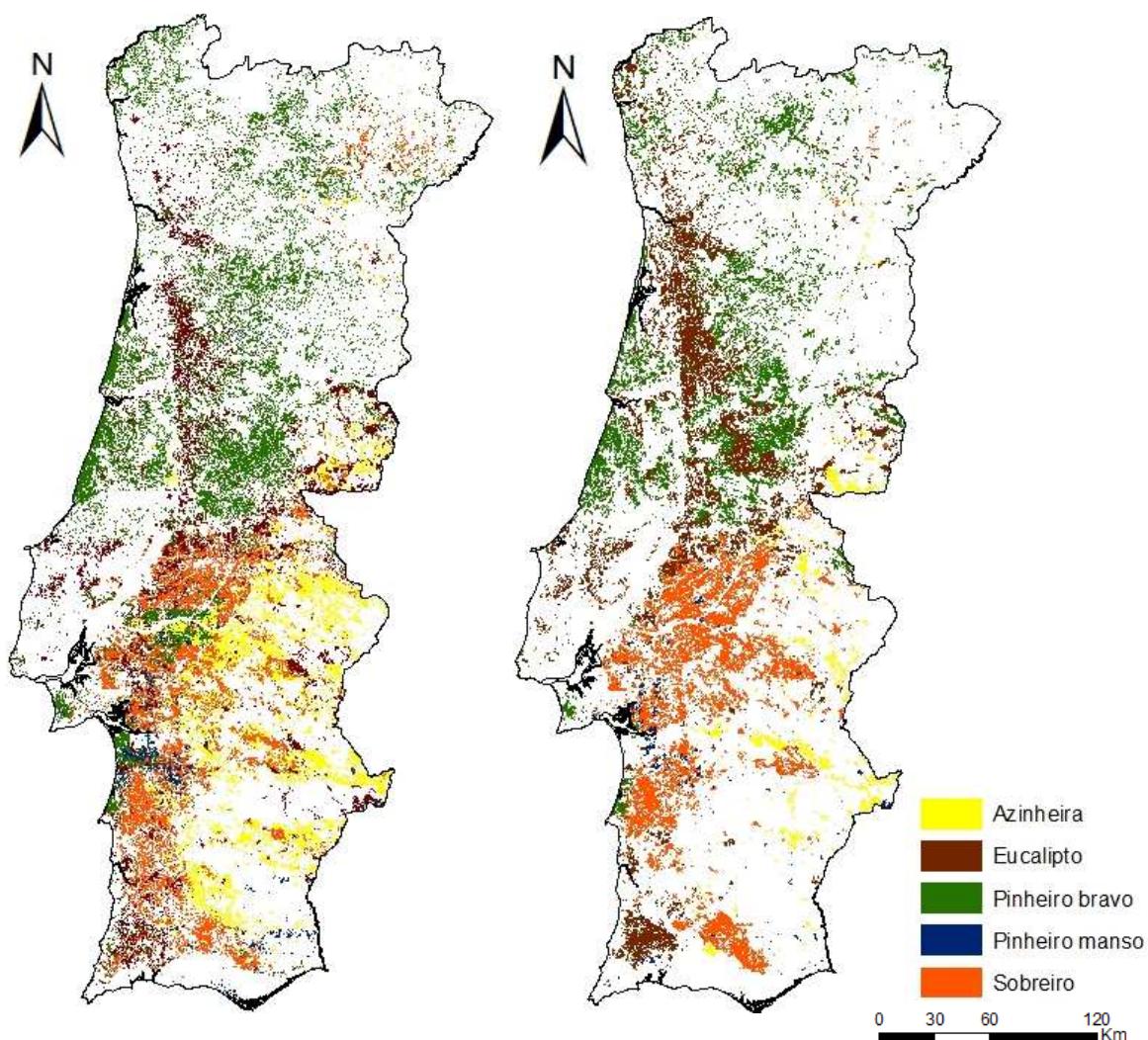


Figura 6 – Mapas com a distribuição das cinco principais espécies florestais em Portugal, referentes aos anos de realização dos dois últimos IFN, 1995-1998 (esquerda) e 2005-2006 (direita).

É interessante reparar na variação em termos de área, que tem afectado duas das principais espécies florestais portuguesas:

- A área de Pinheiro bravo tem vindo a reduzir-se substancialmente, passando de mais de um milhão de hectares em meados dos anos 90, para cerca de 700 mil hectares no início desta década (DGRF, 2007). Tal ficará a dever-se sobretudo à acção do fogo, que tem atingido fortemente estas regiões, não permitindo a sua regeneração.
- Por outro lado, a área de Eucalipto tem tido uma trajectória oposta, com um crescimento assinalável ao longo dos últimos 20 anos. Em meados dos anos 90 contavam-se cerca de 400

mil hectares desta espécie e actualmente as estimativas rondam os 650 mil hectares (DGRF, 2007), estando quase a par do Pinheiro bravo como espécie que maior área ocupa. A importância económica desta espécie e a forte pressão da indústria do papel provocaram este aumento acentuado. Estas áreas são também fortemente afectadas pelo fogo. Contudo, graças ao seu rápido crescimento, conseguem regenerar muito mais facilmente, estando, relativamente ao Pinheiro bravo, em clara vantagem nesse aspecto.

As zonas de matos espalhadas ao longo do país, resultantes do abandono rural de terrenos agrícolas e florestais, são responsáveis pela maior parte da área queimada que se verifica todos os anos e servem de veículo de transporte do fogo para o interior dos povoamentos florestais (Fig. 7).

Por fim, as culturas agrícolas, que continuam a representar uma importante área no país e as práticas que lhes estão associadas (queimadas) são também, muitas vezes, causas de incêndios de maiores proporções (Fig. 7).

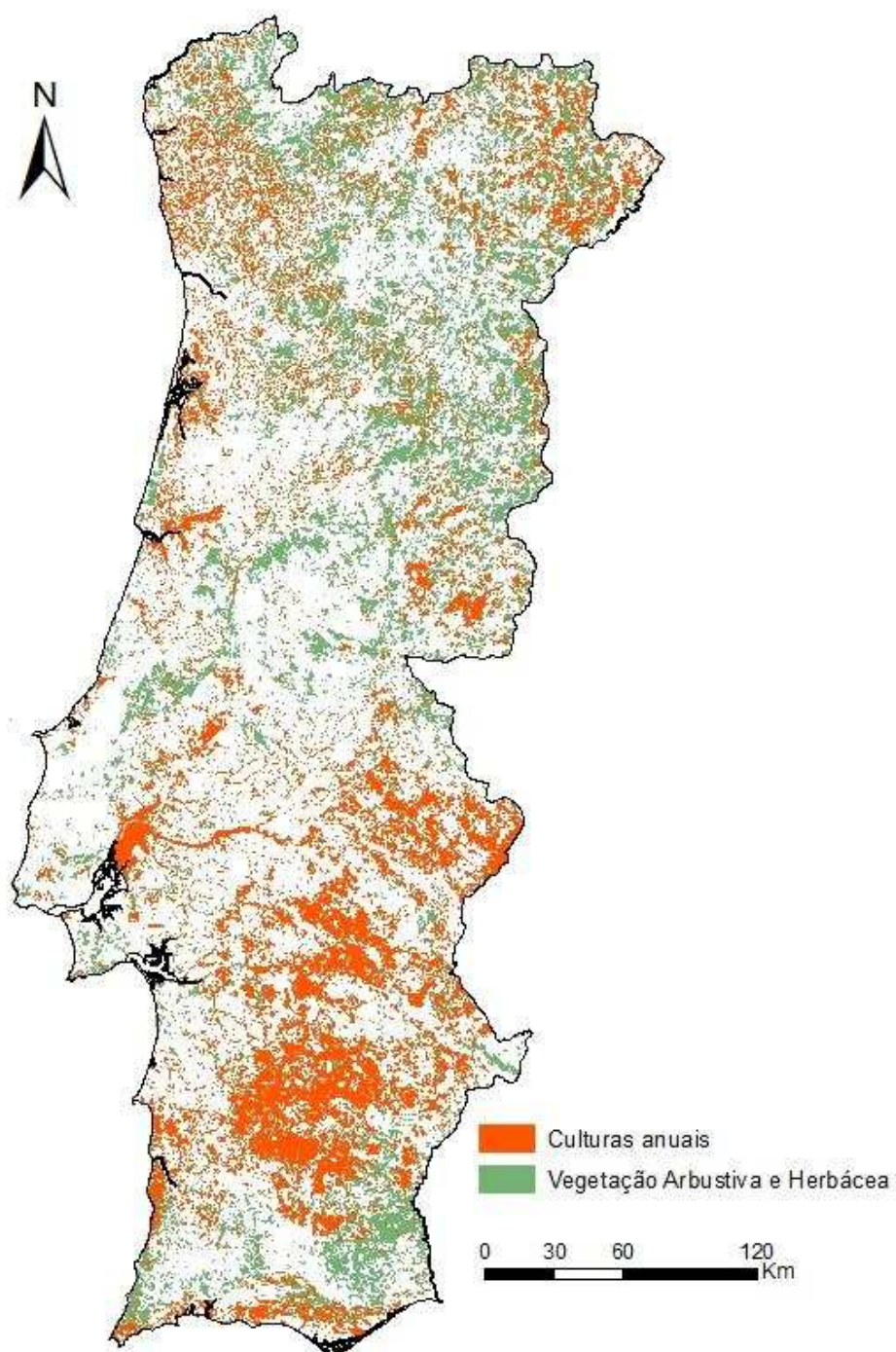


Figura 7 – Mapa com a distribuição das culturas anuais e da vegetação arbustiva e herbácea (fonte: CORINE LandCover 2000).

3. Material e métodos

Para se fazer a estimativa das emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera, resultantes dos incêndios em Portugal Continental, durante o período compreendido entre 1990 e 2008, recorreu-se a um modelo que se baseia na metodologia descrita por Seiler e Crutzen (1980), e que pode ser apresentado, tal como em Silva *et al.* (2006), da seguinte forma:

$$E_a = \sum_i \sum_n A_i B_{ni} \alpha_{ni} Fe_a \quad (1)$$

Em que, para cada ano, E_a representa a massa do composto a emitida (kg); A_i representa a área ardida na classe de ocupação do solo i (ha); B_{ni} representa a biomassa da componente n (folhada, arbustos, folhas ou ramos finos), presente na classe de ocupação do solo i ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$); α_{ni} representa o factor de combustão relativo à componente n da biomassa, na classe de ocupação do solo i (adimensional) e Fe_a representa o factor de emissão do composto a ($\text{kg} \cdot \text{Mg}^{-1}$).

Assim sendo, tornou-se necessário determinar a área ardida, a biomassa de cada componente e os factores de combustão e de emissão, para cada classe de ocupação do solo, durante o período de tempo considerado.

3.1 Área ardida por classe de ocupação do solo

Para calcular a área ardida por classe de ocupação do solo, em Portugal Continental, no período pretendido entre 1990 e 2008, seguiu-se uma metodologia semelhante à descrita por Pereira e Santos (2003). Estes autores disponibilizam no seu trabalho, um Quadro com a determinação da área ardida por classe de ocupação do solo, entre 1990 e 1999, assumindo que o único factor de alteração da ocupação do solo é o fogo. No entanto, aquando da realização do mesmo, a Carta de Ocupação do Solo (COS90) – projecto nacional de caracterização da ocupação do solo – apenas se encontrava disponível para a zona Norte do país, sendo, por isso, necessário recorrer ao projecto Corine LandCover – projecto europeu de caracterização da ocupação do solo em vários países (CORINE90), da mesma época, para completar a informação para todo o país. Note-se que não só a resolução espacial destas duas fontes de informação é diferente, sendo 1:25000 (mais rigoroso) no caso da COS90 e 1:100000 (menos rigoroso) no caso do CORINE90, como também a área mínima cartografada, sendo 1ha na COS90 e 25ha no CORINE.

Actualmente, o Instituto Geográfico Português (IGP) disponibiliza a COS90 para, praticamente todo o país (Fig. 8), tornando-se assim apenas necessário recorrer ao CORINE90 (informação menos rigorosa) para pequenas regiões. Por esta razão, optou-se por actualizar o Quadro apresentado pelos autores acima referidos.

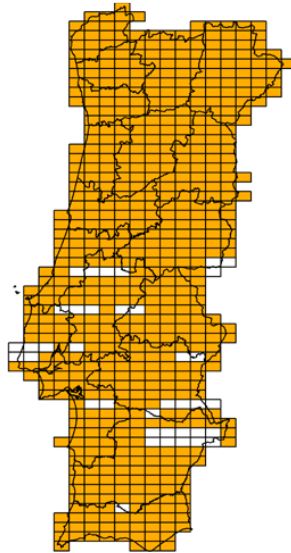


Figura 8 – Distribuição espacial das 638 folhas disponíveis da COS90 (fonte: IGP)

Uma vez que a COS90 apresenta uma extensa lista de códigos possíveis (mais de 700), que caracterizam a ocupação do solo em Portugal Continental, decidiu-se agrupá-los num conjunto de 18 classes semelhantes às apresentadas por Pereira e Santos (2003). Considerando que a mesma área pode arder mais do que uma vez ao longo do período considerado, a estas classes foram acrescentadas outras 9, que representam áreas que arderam mais do que uma vez, tal como em Pereira e Santos (2003). Depois de feito o agrupamento em classes, cruzou-se a informação de ocupação do solo com as áreas ardidas de Portugal Continental, no período compreendido entre 1990 e 1999 (cartografia feita pelo Laboratório de Detecção Remota e Análise Geográfica, do Instituto Superior de Agronomia), utilizando o software *ArcGIS*.

Para o período compreendido entre 2000 e 2008, a informação sobre a ocupação do solo em Portugal Continental, resume-se àquela que é disponibilizada pelo CORINE00. No entanto, neste caso, surge outro problema: a legenda do CORINE não diferencia as espécies florestais, ao contrário do que acontece com a legenda da COS, limitando-se a três grandes classes denominadas “Floresta de folhosas”, “Floresta de resinosas” e “Floresta mista”. Contudo, não interessa considerar na mesma classe espécies que possuam comportamentos muito diferentes

em relação ao fogo, tornando-se assim necessário desagregar estas três grandes classes de floresta, em classes como as apresentadas para o período anterior (Sobreiro, Azinheira, Eucalipto, Pinheiro manso, Pinheiro bravo, Outras folhosas, Outras resinosas e Floresta mista de Pinheiro bravo e Eucalipto). Para tal, recorreu-se à informação do Inventário Florestal Nacional 2005-2006 (IFN0506), mais concretamente, aos fotopontos e à respectiva ocupação florestal principal e secundária.

Primeiramente, fez-se uma actualização do CORINE00 com as áreas ardidas até 2006, uma vez que os voos para tirar as fotografias aéreas foram realizados entre 2004 e 2006 (Tomé *et al.*, 2007). Em seguida, sobrepôs-se os fotopontos com estas áreas (representadas por polígonos no software utilizado) e classificaram-se os polígonos consoante a informação dada pelo fotoponto, relativamente à ocupação florestal principal e secundária (Fig. 9). Note-se que se assumiu que em 6 anos, ou seja, entre 2000 (ano da área inicial que se pretende determinar) e 2006 não houve alterações na ocupação do solo, excepto pela acção do fogo. Este pressuposto permitiu assumir que a área de floresta determinada em 2006 fosse a mesma que existiria em 2000. Estas operações foram feitas recorrendo também ao software ArcGIS.

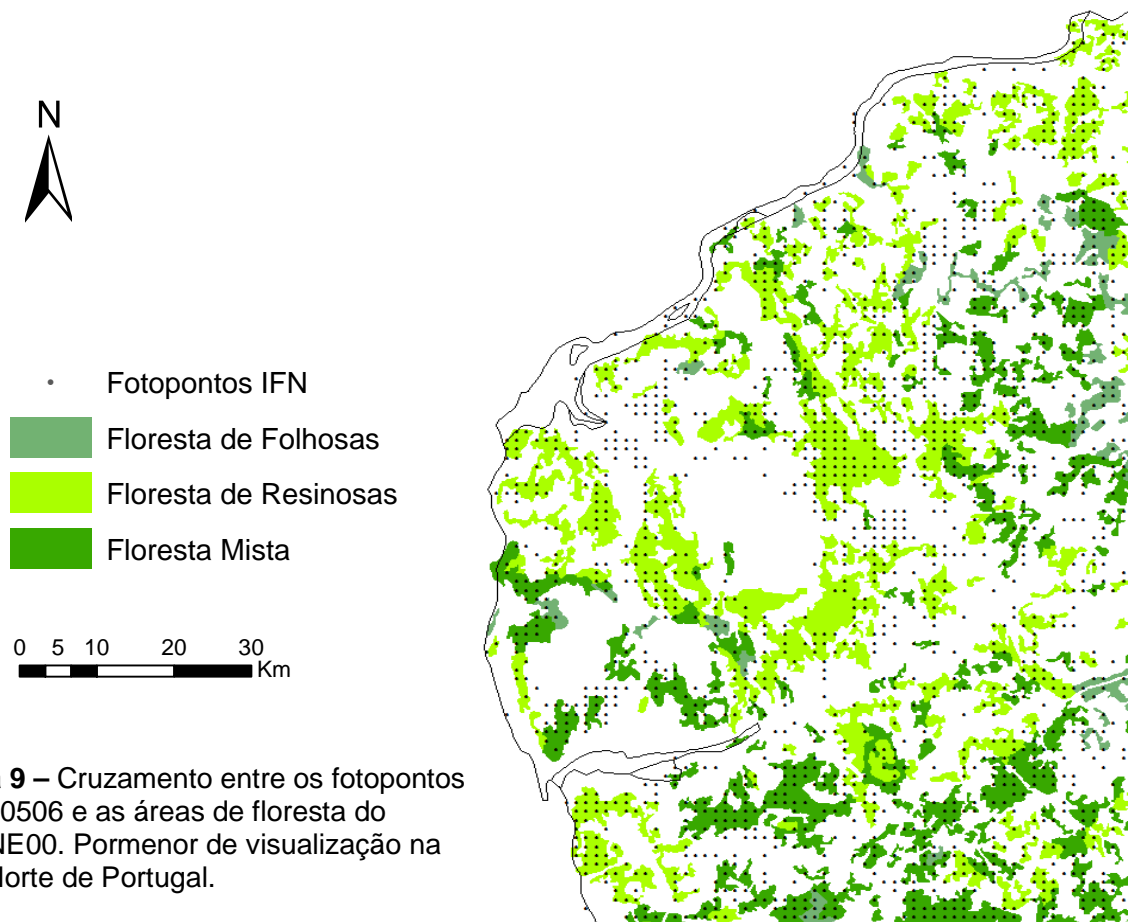


Figura 9 – Cruzamento entre os fotopontos do IFN0506 e as áreas de floresta do CORINE00. Pormenor de visualização na zona Norte de Portugal.

Quando se verificou que o mesmo polígono continha mais do que um fotoponto, optou-se por classificar o polígono com a informação dada pela maioria dos pontos. Nalguns polígonos, por serem de dimensões reduzidas, não havia nenhum fotoponto disponível na sua área. Para resolver este problema optou-se por criar polígonos de Thiessen, com base na informação dada pelos fotopontos. Deste modo, criou-se uma partição da área de estudo (Portugal Continental) em função da distância ao fotoponto mais próximo. A descrição de todas as classes usadas neste trabalho encontra-se no anexo I.

Depois de feita a actualização do CORINE00 e determinadas as áreas iniciais (em 2000), cruzou-se esta informação com a área ardida entre 2000 e 2008 (cartografia feita no Departamento de Engenharia Florestal, do Instituto Superior de Agronomia), seguindo procedimento semelhante àquele que foi descrito para o período anterior (Fig. 10).

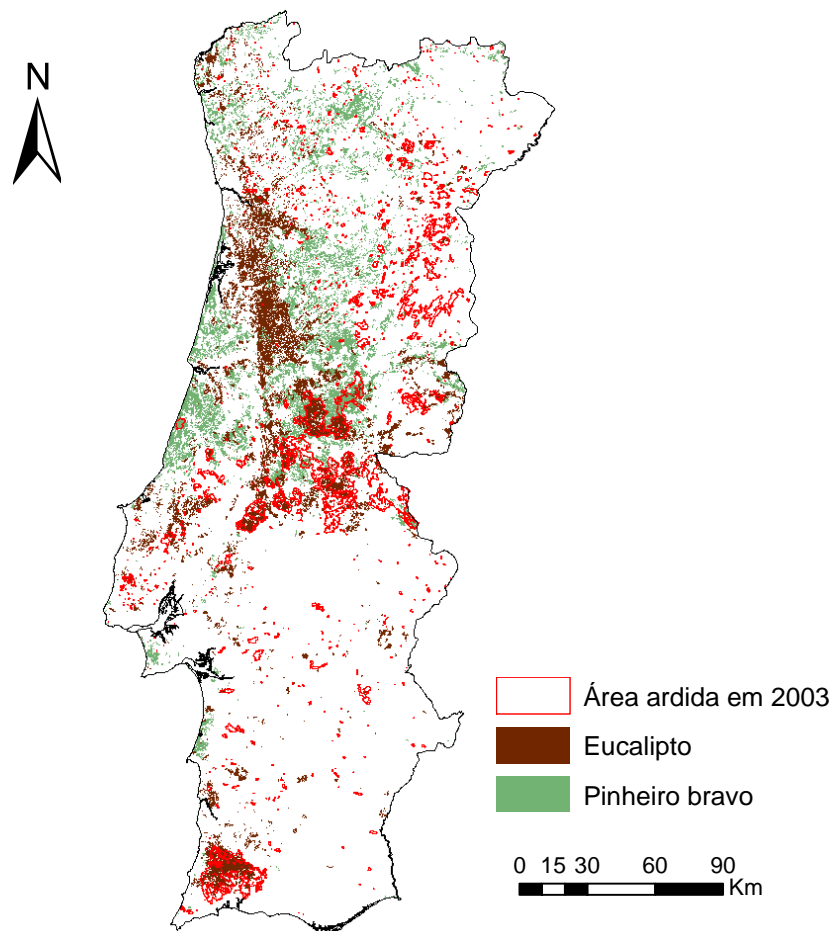


Figura 10 – Exemplo da metodologia seguida para a determinação da área ardida por tipo de ocupação do solo.

3.2 Biomassa presente nas diferentes classes de ocupação do solo

Os matagais e povoamentos florestais do tipo Mediterrânico apresentam uma grande variabilidade de biomassa acima do solo (Joffre e Rambal, 2002). A estimativa desta biomassa, presente nas diferentes classes de ocupação do solo, pode considerar-se uma tarefa difícil devido à grande heterogeneidade dos ecossistemas e ao carácter dinâmico da vegetação.

Sendo as classes de ocupação do solo muito diferentes entre si, relativamente ao comportamento do fogo e na sua composição em biomassa disponível para ser consumida pelo mesmo, optou-se, tal como em Silva *et al.* (2006), por dividir a determinação da biomassa nestas classes, em três grandes grupos com características mais semelhantes: Florestas, Matos e Outras classes (relacionadas com actividades agrícolas).

3.2.1 Florestas

É muito importante conhecer a estrutura vertical (os estratos de vegetação) dos povoamentos florestais, para tentar perceber o perigo de queima e facilidade de propagação do fogo no mesmo (Fernandes *et al.*, 2006).

Assim sendo, uma vez que um fogo, dependendo da sua intensidade, poderá afectar não só o combustível que se encontra à superfície do solo num povoamento florestal, mas também as próprias copas das árvores, neste primeiro grupo as diferentes componentes da biomassa consideradas foram, à superfície do solo: a folhada e os arbustos; e nas copas das árvores: as folhas e os ramos finos.

3.2.1.1 Folhada

Quando morrem, as folhas, os pequenos ramos, as flores, os frutos e os fragmentos de casca caem e vão-se acumulando à superfície do solo formando uma camada chamada folhada (Matthews, 1997). Esta representa uma importante fonte de riqueza para o solo, uma vez que estes materiais à medida que se vão decompondo, vão libertando nutrientes.

Tratando de material morto, este é facilmente consumido quando ocorre um fogo, devido à forma como rapidamente perde o pouco teor de humidade que ainda consegue reter. Esta rapidez vai depender das características de cada componente da folhada, sendo que os materiais mais finos são aqueles que mais facilmente são consumidos.

Para se obter uma estimativa da acumulação de folhada foi feita uma pesquisa bibliográfica, procurando valores característicos para povoamentos das principais espécies florestais existentes em Portugal. No Quadro 1, apresenta-se a informação encontrada, resumida aos valores e respectiva fonte.

Quadro 1 – Acumulação de folhada (Mg.ha^{-1}) por tipo de ocupação florestal e respectiva fonte.

Ocupação florestal	Acumulação de folhada (Mg.ha^{-1})	Fonte
Sobreiro	5,57	García <i>et al.</i> (2006)
	4,3 – 7,6	Fernandes <i>et al.</i> (2000b)
	1,28 – 4,75	Fernandes <i>et al.</i> (2006)
Azinheira	5,57	García <i>et al.</i> (2006)
	4,3 – 7,6	Fernandes <i>et al.</i> (2000b)
	1,28 – 6,37	Fernandes <i>et al.</i> (2006)
Eucalipto	5,8	Madeira <i>et al.</i> (2002)
	5,7	Cruz e Viegas (2001)
	1,5	Viegas <i>et al.</i> (1998)
	0,83 – 5,16	Fernandes <i>et al.</i> (2006)
Outras folhosas	4,3 – 5,1	Fernandes <i>et al.</i> (2000b)
	5,4 – 7,5	van Wesemael e Veer (1992)
	2,85	Viegas <i>et al.</i> (1998)
	1,60 – 6,37	Fernandes <i>et al.</i> (2006)
Pinheiro bravo	10,3	Cruz e Viegas (2001)
	5,1 – 32,1	Fernandes <i>et al.</i> (2002)
	1,2 – 7,4	Botelho <i>et al.</i> (1994)
	7,50 – 8,98	Kavvadias <i>et al.</i> (2001)
	1,2 – 19,9	Fernandes e Rigolot (2007)
	10,4	van Wesemael e Veer (1992)
	1,7 -13,3	Viegas <i>et al.</i> (1998)
Pinheiro manso	1,36 – 7,36	Fernandes <i>et al.</i> (2006)
	6,5	Stamou <i>et al.</i> (1998)
Outras resinosas	3,2 – 7,2	Stamou <i>et al.</i> (1998)
	10,2	Dimitrakopoulos (2002)
	13,79 – 16,38	Kavvadias <i>et al.</i> (2001)
Floresta mista (Pb+Ec)	Média dos valores de Pinheiro bravo e Eucalipto	
Floresta mista (Ec+Sb)	Média dos valores de Eucalipto e Sobreiro	

Todos os valores do quadro acima apresentado foram obtidos através de amostragens feitas no campo, em Portugal ou em países/regiões de condições semelhantes (ex. Grécia, Itália).

Fernandes e Rigolot (2007), estudaram povoamentos de Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), no Norte e Centro de Portugal, tal como Fernandes *et al.* (2002), de idades compreendidas entre os 10 e 18 anos, bem como povoamentos adultos no Noroeste de Portugal e no Noroeste e Sul de Espanha. Também Botelho *et al.* (1994), no seu estudo sobre o comportamento do fogo

controlado e respectivo consumo de combustível, descreveu vários povoamentos de pinheiro bravo, na Galiza e no Norte e Centro de Portugal.

Madeira *et al.* (2002), estudaram as alterações do stock de carbono dependendo da disponibilidade de água e nutrientes, num povoamento de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) na região de Óbidos, em Portugal, recolhendo amostras da acumulação de folhada 6 anos após ter sido feita a plantação.

Viegas *et al.* (1998), estudaram a combustibilidade de vários tipos de combustíveis florestais, recolhendo dados em diversos povoamentos no Centro de Portugal para as seguintes espécies: Pinheiro bravo, Eucalipto e Castanheiro (*Castanea sativa*) (aqui considerada na classe Outras Folhosas). Também Cruz e Viegas (2001) caracterizaram povoamentos de *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus* na zona Centro do país no seu estudo sobre o comportamento do fogo.

García *et al.* (2006) avaliaram, por amostragem, a acumulação de folhada no solo de dois povoamentos dominados por Sobreiro (*Quercus suber*) e outros Carvalhos, um no Sul de Portugal e outro no Sul de Espanha, no seu estudo sobre a acção da luz e dos nutrientes do solo no subcoberto de florestas mediterrânicas de carvalhos.

Fernandes *et al.* (2000), no estudo sobre a combustibilidade das comunidades vegetais na Serra da Malcata, apresentam valores de acumulação de folhada para várias espécies arbustivas e outras arbóreas como: *Quercus rotundifolia*, *Arbutus unedo* e *Quercus pyrenaica* (todas aqui classificadas como Outras folhosas).

Dimitrakopoulos (2002) inclui no seu estudo de modelos de combustível mediterrânicos e comportamento potencial do fogo na Grécia, uma descrição de povoamentos de *Pinus halepensis* e *Pinus brutia* (aqui classificados como Outras resinosas).

Kavvadias *et al.* (2001) estudaram a queda de folhada, sua acumulação e decomposição em povoamentos com diferentes qualidades da estação, de quatro espécies (aqui apenas foram considerados os valores obtidos para duas: *Pinus pinaster* e *Pinus nigra*), no Norte da Grécia. Também na Grécia, mas no seu trabalho sobre a eficiência do sistema de prevenção e supressão de fogos, Stamou *et al.* (1998) caracteriza vários tipos de coberto, entre os quais povoamentos dominados por *Pinus halepensis*, *Pinus nigra* e *Pinus pinea*.

Por sua vez, van Wesemael e Veer (1992) estudaram vários tipos de floresta mista mediterrânica conjugando entre si espécies como *Quercus ilex*, *Quercus suber*, *Pinus pinaster*,

entre outras, a sul da Toscana (ou Toscana), em Itália, no seu trabalho sobre a acumulação de material orgânico e a decomposição da folhada.

Por fim, Fernandes *et al.* (2006) utilizaram os dados do Inventário Florestal Nacional (IFN) para criar modelos de combustível característicos das principais espécies portuguesas: *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus*, *Quercus suber* e para outros carvalhos (considerados na classe Outras folhosas).

É importante perceber, que mesmo considerando que todos estes estudos foram realizados em países/regiões com condições semelhantes às encontradas em Portugal, facilmente se observa a grande variabilidade de valores mesmo quando se referem às mesmas ocupações florestais. Tal fica a dever-se aos numerosos factores que vão influenciar, directa ou indirectamente, a acumulação de folhada, como sejam o clima (temperatura e precipitação), a qualidade do solo, a densidade de árvores e arbustos, entre outros. Este facto torna praticamente impossível recorrer a um valor médio que seja característico para todo o país, quando se pretende estimar as emissões resultantes dos fogos, frisando ainda mais a importância de se determinar as incertezas associadas ao resultado do modelo.

3.2.1.2 Arbustos

Os povoamentos florestais, para além da camada de folhada descrita no ponto anterior e do seu estrato de copas, apresentam também vegetação arbustiva que representa uma importante fonte de combustível. As zonas com grande acumulação arbustiva permitem que o fogo se propague facilmente pelo povoamento, podendo passar para as copas das árvores, caso haja uma conexão entre estes dois estratos de vegetação.

No sentido de determinar a biomassa arbustiva, presente nos diferentes tipos de povoamentos florestais considerados, seguiu-se uma metodologia semelhante à adoptada por Silva *et al.* (2006), aplicando a equação 2 aos dados do IFN0506:

$$B_j = \sum_i^6 pb_s PC_{si} A_i 10000 \quad (2)$$

Em que, B_j representa a biomassa arbustiva da parcela j ($Mg \cdot ha^{-1}$); pb_s representa a densidade aparente da espécie arbustiva s ($kg \cdot m^{-3}$); PC_{si} representa a percentagem de coberto da espécie arbustiva s na classe de altura i (%) e A_i representa a altura da classe i (m).

As densidades aparentes das diferentes espécies arbustivas consideradas resultam do trabalho de Silva *et al.* (2006) e são parte integrante do IFN0506.

3.2.1.3 Copa – Folhas

As folhas das copas das árvores muitas vezes não são afectadas pelo fogo, ou porque não existe uma ligação entre os estratos de combustível, ou porque o fogo não é suficientemente intenso e fica-se pelos combustíveis de superfície. No entanto, se este atinge as copas, poderá provocar fortes danos na árvore. Uma árvore cuja copa tenha sido fortemente afectada pelo fogo, terá grandes dificuldades em sobreviver, uma vez que perdeu grande parte do seu tecido fotossintético.

A determinação da biomassa foliar foi feita utilizando os dados das árvores medidas no IFN0506. Para as classes de Pinheiro bravo, Eucalipto e Outras resinosas utilizaram-se as equações apresentadas por Tomé *et al.* (2007); para a classe de Pinheiro manso recorreu-se à equação descrita por Correia *et al.* (2008); e para as restantes classes de outras espécies florestais aplicaram-se as equações descritas em Montero *et al.* (2005).

Contudo, antes de se aplicar a equação de cálculo da biomassa foliar respectiva, foi necessário estimar a altura total das árvores pertencentes às classes Pinheiro bravo, Pinheiro manso, Eucalipto, Outras resinosas, Pinheiro bravo com Eucalipto e Eucalipto com Sobreiro (os eucaliptos), recorrendo a relações hipsométricas descritas em Tomé *et al.* (2007), uma vez que, no IFN0506, apenas foram medidas as alturas das árvores dominantes e árvores amostra (Tomé *et al.*, 2007).

Quadro 2 – Equações utilizadas para a determinação da biomassa foliar.

Espécie florestal	Variável a determinar	Equação utilizada
Pinheiro bravo e Outras resinosas	Altura total	$h = h_{dom} \left(1 + \left(\beta_0 + \beta_1 \frac{N}{1000} \right) e^{\beta_2 h_{dom}} \right) \left(1 - e^{\beta_3 \frac{d}{h_{dom}}} \right)$ $\beta_0 = 0,0795 \quad \beta_1 = 0,0211$ $\beta_2 = 0,0254 \quad \beta_3 = -1,1658$
	Biomassa foliar	$w_i = \beta_0 d^{\beta_1} \left(\frac{h}{d} \right)^{\beta_2}$ $\beta_0 = 0,09980 \quad \beta_1 = 1,39252 \quad \beta_2 = -0,71962$
Pinheiro manso	Altura total	$h = h_{dom} \left(1 + \beta_0 h_{dom} e^{(\beta_1 h_{dom})} \right) \left(1 - e^{(\beta_2 d / d_{dom})} \right)$ $\beta_0 = 0,004056 \quad \beta_1 = -0,00884 \quad \beta_2 = -2,05189$
	Biomassa foliar	$w_i = \beta_0 c^{\beta_1} \left(\frac{h}{d} \right)^{\beta_2}$ $\beta_0 = 0,248952 \quad \beta_1 = 1,264033 \quad \beta_2 = -0,7121$
Eucalipto	Altura total – 1ª rotação	$h = h_{dom} e^{\left(\left(\beta_0 + \beta_1 h_{dom} + \beta_2 \frac{N}{1000} + \beta_3 dg \right) \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_{dom}} \right) \right)}$ $\beta_0 = -1,77086 \quad \beta_1 = -0,233239$ $\beta_2 = 0,548798 \quad \beta_3 = -0,055274$
	Altura total – Talhadia	Equação igual à anterior excepto o parâmetro: $\beta_0 = -1,729112$
	Altura total – Sem rotação	Equação igual à anterior excepto o parâmetro: $\beta_0 = -1,778407$
	Biomassa foliar	$w_i = \beta_0 d^{\beta_1} \left(\frac{h}{d} \right)^{\beta_2}$ $\beta_0 = 0,248952 \quad \beta_1 = 1,264033 \quad \beta_2 = -0,7121$
Sobreiro e Azinheira	Biomassa foliar	$BH = e^{(SEE^{a/2})} e^a d^b$ $SEE = 0,818511 \quad a = -6,05826 \quad b = 2,14483$
Outras folhosas	Biomassa foliar	Equação igual à anterior mas com os seguintes valores: $SEE = 0,323989 \quad a = -3,98028 \quad b = 1,96752 \text{ (Q.faginea)}$ $SEE = 0,292365 \quad a = -3,69674 \quad b = 1,73143 \text{ (Q.robur)}$ $SEE = 0,468575 \quad a = -3,36508 \quad b = 1,5955 \text{ (Populus spp.)}$ $SEE = 0,386253 \quad a = -3,28444 \quad b = 1,59452 \text{ (Betula spp.)}$ $SEE = 0,354275 \quad a = -2,19442 \quad b = 1,62588 \text{ (C. siliqua)}$

No Quadro 2, encontram-se as equações, e respectivos parâmetros, que foram utilizadas nesta secção, nas quais:

- h , representa a altura total (m);
- h_{dom} , representa a altura dominante do povoamento (m);
- N , representa o número de árvores por hectare;
- d , representa o diâmetro da árvore medido a 1,30m de altura (cm);
- d_g , representa o diâmetro quadrático médio (cm);
- d_{dom} , representa o diâmetro dominante (cm);
- w_i , representa a biomassa da componente i da árvore, neste caso, as folhas (kg);
- c , representa a circunferência da árvore medida a 1,30m de altura (m);
- BH , representa a biomassa das folhas (kg);
- SEE , representa o erro padrão da estimativa.

3.2.1.4 Copa – Ramos finos

Para além das folhas, quando um fogo atinge a copa duma árvore irá consumir também os ramos mais finos da mesma. Tal deve-se à relação superfície/volume desta componente da biomassa ser elevada. Optou-se por quantificar apenas os ramos com diâmetro inferior a 2cm, correspondendo aos combustíveis de 1 e 10h de tempo de resposta, por serem estes os mais tipicamente consumidos nos fogos florestais. Apesar disso poderá haver alguma subestimação da biomassa consumida, isto é, em fogos muito intensos, os ramos mais grossos podem também ser consumidos.

Uma vez que as equações de biomassa do IFN0506, apresentadas em Tomé *et al.* (2007), relativamente aos ramos, não diferenciam classes de diâmetro, e que do ponto de vista do fogo o que arde efectivamente são os ramos mais finos (Botelho *et al.*, 1994), optou-se por utilizar as equações apresentadas em Montero *et al.* (2005), que resultam de inventários florestais feitos em regiões espanholas, para os ramos de diâmetro inferior a 2cm. As equações que a seguir se apresentam foram aplicadas aos dados das árvores medidas no IFN0506.

Quadro 3 – Equações utilizadas no cálculo da biomassa de ramos finos.

Espécie florestal	Equação utilizada
Sobreiro e Azinheira	$BR_2 = e^{(SEE^{2/2})} e^a d^b$ SEE = 0,754127 a = -5,33638 b = 2,10315
Eucalipto	Equação igual à anterior mas com os seguintes valores: SEE = 0,333087 a = -2,64825 b = 1,61429
Outras folhosas	Equação igual à anterior mas com os seguintes valores: SEE = 0,373270 a = -2,65716 b = 1,64983 (<i>Betula spp.</i>) SEE = 0,323418 a = -1,55218 b = 1,69381 (<i>C. sativa</i>) SEE = 0,355049 a = -1,81674 b = 1,6254 (<i>C. siliqua</i>) SEE = 0,498239 a = -1,69368 b = 1,73303 (<i>Fraxinus spp.</i>) SEE = 0,471417 a = -2,42121 b = 1,60846 (<i>Populus spp.</i>) SEE = 0,323957 a = -3,44735 b = 1,96728 (<i>Q. faginea</i>) SEE = 0,562992 a = -4,85139 b = 2,38766 (<i>Q. pyrenaica</i>) SEE = 0,330875 a = -2,47029 b = 1,62158 (<i>Q. robur</i>)
Pinheiro bravo	Equação igual à anterior mas com os seguintes valores: SEE = 0,527572 a = -4,66658 b = 2,38009
Pinheiro manso	Equação igual à anterior mas com os seguintes valores: SEE = 0,482010 a = -2,55308 b = 1,93944
Outras resinosas	Equação igual à anterior mas com os seguintes valores: SEE = 0,226267 a = -2,74498 b = 2,03748 (<i>P. halepensis</i>) SEE = 0,529942 a = -2,08375 b = 1,51001 (<i>P. sylvestris</i>)

No Quadro 3, encontram-se as equações que foram utilizadas nesta secção, nas quais:

- BR_2 , representa a biomassa dos ramos com diâmetro menor que 2cm (kg);
- d, representa o diâmetro da árvore medido a 1,30m de altura (cm);
- SEE, representa o erro padrão da estimativa.

3.2.2 Matos

Neste segundo grupo, as componentes consideradas foram a folhada e os arbustos, uma vez que estas classes não apresentam espécies arbóreas. Importa referir que dentro deste grupo

incluem-se classes em que a idade da vegetação é conhecida (“Ardido 1990”... “Ardido 2007”) e uma classe em que se desconhece a idade da vegetação (“Vegetação Herbácea e Arbustiva”).

Por serem zonas muitas vezes deixadas ao abandono, atingem grandes acumulações de combustível, tornando fácil a propagação do fogo. Em Portugal, grande parte da área ardida anual resulta de incêndios nestas áreas.

3.2.2.1 Arbustos

Para determinar a biomassa arbustiva das classes incluídas neste grupo, recorreu-se aos dados obtidos por Simões (2006) relativos à acumulação de biomassa arbustiva em função da idade destas comunidades, para Portugal Continental. Ajustou-se o modelo de Olson (1963) (3), que é tipicamente utilizado para estudos de acumulação de combustível (e.g. McCaw *et al.*, 2002 e Simões, 2006), através do método dos mínimos quadrados, recorrendo ao software MatLab.

$$W_{arb} = a (1 - e^{-bt}) \quad (3)$$

Onde W_{arb} representa a biomassa arbustiva ($Mg.ha^{-1}$), a representa a carga máxima de combustível ($Mg.ha^{-1}$), b é um parâmetro relacionado com a taxa de crescimento (ano^{-1}) e t representa o tempo decorrido desde o último fogo (anos).

Para além da estimativa dos parâmetros, obteve-se também o intervalo de confiança a 95% para os mesmos, bem como o erro médio quadrático, que é uma medida de quantificação do erro associado às estimativas.

Nas classes “Ardido 1990” até “Ardido 2007”, conhece-se a idade da vegetação já que, por exemplo, se uma determinada área ardeu em 1990, em 1991 terá um ano, em 1992 terá dois anos e assim sucessivamente até 1999, quando terá 9 anos. Para o período seguinte (2000 a 2008) seguiu-se a mesma ideia. Note-se que não se fez uma série contínua de 1990 até 2008, porque a partir de 2000 se utiliza um novo conjunto de dados (ver 3.1), onde as áreas que arderam entre 1990 e 1999 estão já classificadas noutras classes como, por exemplo, “Vegetação arbustiva e herbácea” ou mesmo uma ocupação florestal ou agrícola.

A equação acima apresentada (3) implica, como já foi referido, o conhecimento da idade da vegetação, algo que é desconhecido para a classe “Vegetação arbustiva e Herbácea”. Assim sendo, para esta classe, tornou-se necessário, primeiramente, encontrar forma de atribuir uma idade média a estas comunidades arbustivas. Para tal, recorreu-se a uma metodologia apresentada por Johnson e Gutsell (1994), baseada na função de Weibull de frequência do fogo

– conceito que pode ser interpretado como o número de anos entre fogos sucessivos, numa determinada área (Oliveira, 2008).

A função de Weibull, que assume uma dependência do perigo de queima com a idade da vegetação (através do parâmetro c , quando este difere de um), é caracterizada por três parâmetros: t , que representa o intervalo de tempo entre fogos consecutivos; b , que é um parâmetro de escala e c que é um parâmetro de forma (controla a forma da distribuição). No seu trabalho, Oliveira (2008) estimou os parâmetros b e c desta função para as 21 regiões PROF (Planos Regionais de Ordenamento Florestal) de Portugal Continental, utilizando intervalos completos, em que se sabe as datas em que ocorram os fogos num determinado local, e incompletos, em que não se sabe quando ardeu pela última vez nem quando voltará a arder (Oliveira, 2008).

Para a obtenção do intervalo de tempo médio entre fogos (“Average Prospective Lifetime” – APL), que permitirá estimar a idade das comunidades arbustivas, recorreu-se aos parâmetros b e c estimados por Oliveira (2008) para intervalos completos e incompletos numa série de 30 anos (1975-2005), e aplicou-se a equação descrita por Johnson e Gutsell (1994):

$$APL = b (\Gamma(2/c)/\Gamma(1/c)) \quad (4)$$

Em que APL representa a idade média da comunidade arbustiva (anos); b representa o parâmetro de escala da função de Weibull (anos); Γ representa a função gamma (adimensional); e c representa o parâmetro de forma da função de Weibull (adimensional).

Depois de determinada a idade média para as diferentes regiões PROF, optou-se por fazer uma selecção e considerar para a média final, apenas aquelas regiões que apresentavam uma percentagem de matos superior a 20% (Fig. 11, Quadro 4), uma vez que, por exemplo, os valores obtidos para o Alentejo, sendo uma zona que pouco arde, por ser em grande parte constituída por culturas agrícolas, iriam influenciar fortemente o valor médio final obtido para a idade da comunidade arbustiva, tornando-o muito mais elevado.

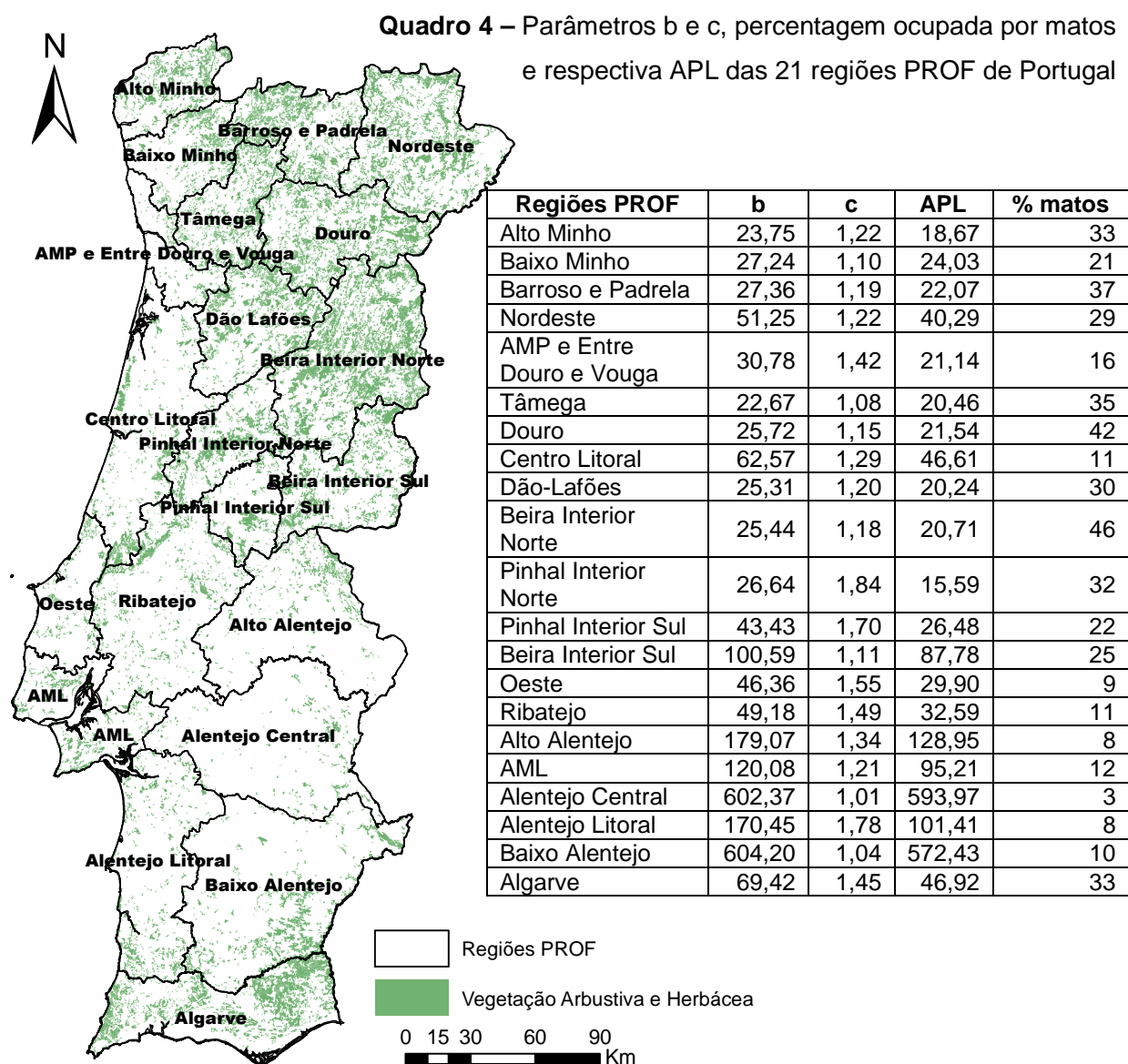


Figura 11 - Mapa com a ocupação arbustiva das regiões PROF (AML e AMP referem-se às áreas metropolitanos de Lisboa e do Porto, respectivamente).

Após ter sido determinada a idade média das comunidades arbustivas presentes na classe “Vegetação arbustiva e herbácea”, aplicou-se a equação 3 com os parâmetros devidamente ajustados, para determinar a biomassa arbustiva desta classe.

3.2.2.2 Folhada

Para determinar a acumulação de folhada nestas classes recorreu-se ao modelo descrito por Olson (1963):

$$X = (L/k) (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

No qual X representa a acumulação de folhada ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$); L representa a produção anual de folhada ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$); k representa a taxa de decomposição (%); e t a idade da vegetação (anos).

Em concordância com o pressuposto assumido por Silva (2004) de que a produção da folhada está dependente da biomassa foliar dos arbustos aplicou-se a equação descrita por Rambal (2001) para determinar o rácio de biomassa de folhas, relativamente à biomassa total (RW_{folhas}):

$$RW_{\text{folhas}} = 0,07 + 0,365e^{-0,000589W_{\text{arb}}} \quad (6)$$

Note-se que a biomassa arbustiva (W_{arb} , aqui em gm^{-2}) é dada pela equação 3 determinada na secção anterior.

Silva (2004) estabeleceu uma relação entre produção média de folhada, de uma comunidade de *Cistus spp.*, que com uma idade média de 15 anos tem uma produção de folhada de $4,04 \text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Simões *et al.*, 2001), e respectiva biomassa foliar. Deste modo, conseguiu-se determinar a produção de folhada média (L), nas comunidades arbustivas com idade entre 1 e 9 anos. Este valor foi depois utilizado na equação 5, para se determinar a acumulação de folhada, por classe de idade. Os resultados obtidos foram, posteriormente, multiplicados por uma percentagem média (50%) de coberto da folhada, descrita em Dimitrakopoulos (2002).

3.2.3 Outras classes

Por não se ter encontrado informação mais actualizada e desenvolvida sobre a acumulação de combustível nas classes caracterizadas por ocupações agrícolas (ex. Pomar, Vinha), optou-se por utilizar os modelos de combustível descritos em Vélez (2000) que também foram utilizados em Silva *et al.* (2006).

O Quadro 5 resume a informação relativa à biomassa que foi utilizada neste grupo de classes.

Quadro 5 – descrição dos modelos de combustível utilizados (Silva *et al.*, 2006).

Ocupação do solo	Modelo NFFL	Descrição	Carga de combustível (Mg.ha ⁻¹)		
			1 HTR	10HTR	Vivo
Pomar, Olival, Áreas agrícolas heterogêneas, Áreas com pouca vegetação	1	Pastos baixos	1,6	- - -	- - -
Territórios agroflorestais	2	Árvores dispersas com pasto e poucos matos	4,5	2,2	1,1
Culturas anuais	3	Pastagens altas	6,7	- - -	- - -
Vinha	5	Zonas de matos verdes, densos e baixos	2,2	1,1	4,5

3.3 Factores de combustão

Os factores de combustão pretendem traduzir a percentagem da biomassa que é efectivamente consumida aquando da passagem de um fogo (Palacios-Orueta *et al.*, 2002). Naturalmente, é muito difícil determinar um valor absoluto, considerando todos os factores que poderão influenciar o consumo de combustível (e.g. clima, topografia, estrutura da vegetação, teor de humidade do combustível). Assim sendo, muitas vezes se recorre a fogos experimentais controlados para estimar estes valores (Botelho *et al.*, 1994, Fernandes *et al.*, 1998). Contudo, um fogo controlado tende a ser menos intenso do que um fogo que ocorre nas suas condições naturais, sem influência do Homem, podendo, por isso, os valores determinados desta maneira serem estimativas por defeito. Também, recorrendo a estimativas por esta técnica, se torna difícil a determinação de valores de consumo da copa, uma vez que os fogos controlados são direccionados apenas para o combustível de superfície (folhada e arbustos).

Neste trabalho, os valores dos factores de combustão foram obtidos através de uma pesquisa bibliográfica estando os respectivos valores encontrados descritos no Quadro 6.

Quadro 6 – Intervalo de variação ou média do factor de combustão por componente de biomassa, incluindo a respectiva fonte.

Componente da biomassa	Factor de combustão (%)	Fonte
Folhada	100	Cinnirella <i>et al.</i> (2007)
	59 – 92	Ormeño <i>et al.</i> (2009)
	90 – 100	van der Werf <i>et al.</i> (2006)
	93	Stephens e Finney (2002)
	50 – 70	Arora e Boer (2005)
	63	Botelho <i>et al.</i> (1994)
	47,6 – 86,7	De Luis <i>et al.</i> (2004)
Arbustos	58,9 – 86,7	Fernandes <i>et al.</i> (2000a)
	60	Cinnirella <i>et al.</i> (2007)
	50	Narayan <i>et al.</i> (2007)
	16 – 100	Fernandes <i>et al.</i> (2000c)
	83	Botelho <i>et al.</i> (1994)
Folhas	88,4 – 95,4	Fernandes <i>et al.</i> (2000a)
	16 – 100	Fernandes <i>et al.</i> (1998)
	100	Cinnirella <i>et al.</i> (2007)
Ramos finos	80 – 100	van der Werf <i>et al.</i> (2006)
	70 – 80	Arora e Boer (2005)
	90	Fernandes <i>et al.</i> (2004)
	50 – 65	Cinnirella <i>et al.</i> (2007)

A maior parte dos autores acima referidos, obtiveram as estimativas recorrendo à técnica de fogo controlado, observando directamente a diferença entre combustível pré e pós-fogo, o que lhes permite uma boa avaliação da percentagem consumida (Cruz e Viegas, 2001).

Fernandes *et al.* (1998) e Fernandes *et al.* (2000c) recorreram à técnica do fogo controlado para estudar a recuperação da vegetação arbustiva (*Erica australis*, *Erica umbellata* e *Chamaespartium tridentatum*) pós-fogo, no Nordeste de Portugal. Do mesmo modo, De Luis *et al.* (2004) estudaram o comportamento do fogo e as características do combustível em matagais de *Ulex parviflorus*, na região Este de Espanha. Outros autores estudaram o comportamento do fogo nas comunidades arbustivas, mas sob o coberto de espécies arbóreas, como o Pinheiro bravo (Botelho *et al.*, 1994, Fernandes *et al.*, 2000a, Fernandes *et al.*, 2004) ou outras coníferas (Stephens e Finney, 2002).

Para além destes estudos de carácter mais local e com trabalho de campo, também estudos de carácter mais global (Arora e Boer, 2005, Cinnirella *et al.*, 2007, Narayan *et al.*, 2007, van der Werf *et al.*, 2006) oferecem estimativas de consumo de combustível para a região do Mediterrâneo.

Ormeño *et al.* (2009) estudou a combustibilidade da folhada de Pinheiro bravo, Pinheiro de Alepo, Pinheiro bravo conjugado com comunidades arbustivas (*C. Ladanifer*, *C. Albidus* e *C. Laurifolius*) e Pinheiro bravo conjugado com Pinheiro do Alepo ou Pinheiro manso.

Também aqui, embora os estudos sejam todos de regiões com características muito semelhantes, se verifica uma grande variabilidade nos valores observados, devido aos factores, tanto climáticos como característicos da vegetação, que podem influenciar esta variável.

Por falta de informação por tipo de espécie florestal ou ocupação agrícola e de matos, optou-se por não diferenciar os valores de factor de combustão obtidos, utilizando os mesmos tanto para as classes de Floresta, como para as de Matos e as Outras classes.

3.4 Factores de emissão

A informação sobre as emissões resultantes da queima de biomassa pode ser representada de duas formas distintas: como rácio de emissão ou factor de emissão, estando o primeiro relacionado com uma espécie química de referência (normalmente o CO₂ ou CO dependendo do objectivo da análise) e o segundo com a biomassa consumida. Assim sendo, dada a natureza deste trabalho, optou-se por seguir a informação que é dada pelos factores de emissão. Este conceito pretende ser uma forma directa de se conhecer a massa emitida de um determinado composto químico, por unidade de massa de combustível consumido (Andreae, 1991, Palacios-Orueta, 2002).

O factor de emissão está directamente dependente do tipo de combustível e do processo de combustão (Delmas *et al.*, 1995). Quando a combustão é completa, a queima de material orgânico produz sobretudo vapor de água e dióxido de carbono (CO₂). Contudo, normalmente, não existe oxigénio suficiente para que a combustão seja completa. Assim sendo, no caso de a combustão ser incompleta, os produtos libertados serão compostos químicos oxidados de forma incompleta, como o monóxido de carbono (CO) ou mesmo reduzidos tais como o metano (CH₄), o amoníaco (NH₃) entre muitos outros (Delmas, 1995, Andreae, 1991, Palacios-Orueta, 2002).

Andreae e Merlet (2001), no seu artigo de revisão sobre a emissão de gases e aerossóis resultantes da queima da biomassa, compilaram uma série de dados sobre os factores de emissão determinados, em condições naturais ou em laboratório, até à data, por muitos outros autores, em várias regiões do globo. Da lista apresentada por estes autores, os valores utilizados neste trabalho foram escolhidos com base nas semelhanças das características das diferentes classes com as categorias apresentadas no artigo. Optou-se assim por recorrer aos

valores (média e respectivo desvio padrão) relativos a “Savanna and grassland”, para as classes mais relacionadas com a agricultura e “Extratropical forest”, para as classes de floresta e matos (Quadro 7).

Quadro 7 – Factores de emissão (média (μ) e desvio padrão (σ)) dos diferentes compostos químicos (g.kg^{-1}): dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), total de hidrocarbonetos não metânicos (THNM), óxido nitroso (N_2O), óxidos de azoto (NO_x), material particulado de diâmetro inferior a $2,5\ \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$), material particulado total (MPT), negro de fumo (NF) e carbono orgânico (C_{or}).

Composto químico	Áreas agrícolas e com pouca vegetação		Florestas e Matos	
	μ	σ	μ	σ
CO_2	1613	95	1569	131
CO	65	20	107	37
CH_4	2,3	0,9	4,7	1,9
THNM	3,4	1,0	5,7	4,6
N_2O	0,21	0,10	0,26	0,07
NO_x	3,9	2,4	3	1,4
$\text{MP}_{2,5}$	5,4	1,5	13	7
MPT	8,3	3,2	17,6	6,4
NF	0,48	0,18	0,56	0,19
C_{or}	3,4	1,4	8,6	9,7

3.5 Análise de incerteza e de sensibilidade

A análise de incerteza, que tipicamente antecede a análise de sensibilidade, permite avaliar a variabilidade do resultado do modelo que resulta da incerteza associada a cada uma das variáveis consideradas. O primeiro passo para realizar esta análise foi caracterizar o melhor possível as variáveis utilizadas, como distribuições estatísticas teóricas ou, quando não foi possível, com alguma medida de variabilidade (Helton e Davis, 2003), com base nos dados obtidos nos pontos anteriores desta tese.

No caso da área ardida (entre 1990 e 2008), como não existem dados comparáveis aos obtidos neste trabalho, optou-se por atribuir um coeficiente de variação de 10% e assumiu-se a variável como sendo normalmente distribuída.

Para o grupo Floresta, recorreu-se ao teste estatístico do χ^2 para ajustar uma distribuição estatística que melhor caracterizasse os dados relativos às biomassas arbustiva, foliar e de ramos finos (Montgomery e Runger, 1999). Quando não se conhece a distribuição estatística dos nossos dados, mas se suspeita de determinada distribuição, pela observação, por exemplo,

de um histograma de frequência das observações, pode-se recorrer a um teste de qualidade do ajustamento para confirmar essa impressão visual. Nalguns casos, dada a grande variabilidade dos dados, não se conseguiu o ajustamento, optando-se por utilizar a distribuição discreta da variável (Salvador *et al.*, 2001).

Ainda para o grupo Floresta, mas no caso da biomassa de folhada, uma vez que os dados disponibilizados na literatura são insuficientes para se efectuar qualquer tipo de ajustamento, optou-se por utilizar o valor médio e o desvio padrão dos valores encontrados, assumindo uma distribuição normal para esta variável.

No grupo dos Matos, em relação à biomassa de folhada, não se conseguiu obter nenhuma estimativa de erro, uma vez que não se dispunha de informação sobre a equação utilizada que permitisse avaliar o erro associado às estimativas. Como tal, esta variável ficou fora da análise de incerteza e de sensibilidade aqui realizadas. Relativamente à biomassa arbustiva, utilizando o software MatLab (onde já tinha sido feito o ajustamento em 3.2.2.1), obteve-se os valores preditos e a estimativa do desvio padrão, para cada um deles (Quadro 13). Assim, optou-se por caracterizar a variável como sendo normal.

Embora seja evidente que os dados provenientes dos modelos de combustível têm, de facto, muitas incertezas associadas, não foi possível introduzi-los na análise por falta de informação sobre a forma como estes valores são determinados. Deste modo, no grupo das Outras classes, apenas se avaliou a incerteza relativa aos factores de combustão e de emissão.

Relativamente aos factores de combustão, seguiu-se metodologia semelhante àquela que foi descrita para a biomassa de folhada nas classes de Floresta, ou seja, utilizando os valores obtidos na bibliografia, calculou-se a média e o desvio padrão e assumiu-se a variável como tendo uma distribuição normal, uma vez que a informação disponível na literatura não é suficiente para qualquer tipo de tratamento estatístico.

Por fim, dado que os valores dos factores de emissão são já apresentados pelos autores (Andreae e Merlet, 2001) com a média e respectivo desvio padrão, optou-se pela distribuição normal para caracterizar esta variável.

Depois de caracterizadas todas as variáveis que entram na análise ($k = 441$ no total), recorreu-se ao método de amostragem de Sobol (Kucherenko, 2008), para constituir a amostra que foi, posteriormente, utilizada nas avaliações do modelo pela técnica de Monte Carlo (Sobol e Kucherenko, 2005). Este método permite uma exploração mais uniforme do espaço dos inputs,

quando comparado, por exemplo, com a amostragem aleatória (Fig. 12). Enquanto na amostragem aleatória, à medida que novos pontos vão sendo adicionados, nada garante que ocupem espaços não preenchidos, no caso destas sequências criadas por Sobol (também chamados números quasi-aleatórios), os novos pontos amostrados “conhecem” a localização dos anteriores e preenchem os espaços livres existentes entre eles (Kucherenko, 2008). Outra característica deste método é a de não seleccionar os valores com probabilidades muito baixas.

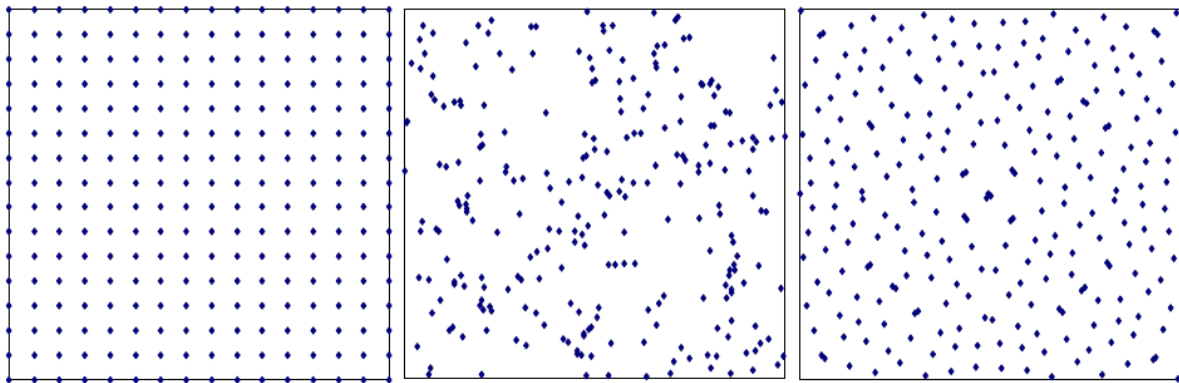


Figura 12 – Comparação entre diferentes métodos de amostragem: regular (esquerda), aleatória (centro) e de Sobol (direita) (fonte: Kucherenko, 2008).

A desvantagem deste método é não permitir um número muito elevado de avaliações do modelo – apenas se conseguiram realizar 256 ($N=256$), dado o seu elevado custo computacional ($N(k+2)$) (Saltelli, 2002). Com os resultados destas avaliações, feitas pela técnica de simulação de Monte Carlo, realizou-se uma análise de incerteza, através da observação dos histogramas resultantes e o cálculo de estatísticas simples como a média e o desvio padrão. Por fim, construiu-se uma série temporal de 19 anos para cada um dos gases estudados neste trabalho, utilizando a média e o desvio padrão em cada ano.

O passo final desta tese, foi realizar uma análise de sensibilidade, com base no método desenvolvido por Saltelli (2002), para tentar perceber qual a variável que tem maior impacto (e quantificá-lo) na variabilidade do *output* do modelo (índices de primeira ordem) e se existem interações entre as variáveis em estudo (índice total de sensibilidade) (Saltelli *et al.*, 2004). O método desenvolvido por este autor é baseado na decomposição da variância do *output* (Chan *et al.*, 1997).

Os índices de primeira ordem (S_i), que tomam valores entre 0 e 1, são uma boa medida de sensibilidade independente do modelo utilizado, e traduzem a redução da variância do *output*

(V_y) que é expectável se conseguíssemos fixar esse factor num valor constante. Estes índices foram determinados recorrendo à seguinte fórmula (Saltelli *et al.*, 2004):

$$S_i = V(E(Y|X_i))/V_y \quad (7)$$

Este índice indica para que variáveis se devem direccionar esforços no sentido de reduzir as incertezas no resultado do modelo.

Os índices totais de sensibilidade (ST_i) permitem identificar variáveis que não sejam essenciais, isto é, aquelas que não têm importância, quando sozinhas ou combinadas com outras. Assim, se ST_i for maior do que S_i , significa que o factor X_i interage com outras variáveis. Se, por outro lado, ST_i se aproxima de zero, significa que o factor X_i poderia ser fixado num valor constante dentro do seu espaço de incerteza. Apesar dos índices permitirem identificar a existência de interacções entre as variáveis, eles não permitem saber com quais e de que maneira é que as variáveis interagem (Saltelli *et al.*, 2008)

$$ST_i = E[V(Y|X_{-i})]/V_y \quad (8)$$

A diferença $ST_i - S_i$ produz uma medida de quanto é que a variável X_i está envolvida em interacções com outras variáveis. A fracção do modelo que não é explicada pelos efeitos singulares das variáveis, e que resulta das interacções entre estas é dada pela diferença $1 - (\sum_i S_i)$ (Saltelli *et al.*, 2004).

Os resultados de uma análise de sensibilidade ajudam a perceber quais as variáveis prioritárias para melhor quantificação, para reduzir as incertezas nos resultados do modelo que se aplica, sendo úteis também para eventuais simplificações do modelo.

4. Resultados

4.1 Área ardida por classe de ocupação do solo

Os Quadros 8 e 9 resultam do procedimento descrito em **3.1**, para a determinação da área ardida por classe de ocupação do solo, entre 1990 e 2008. Nos últimos anos assistiu-se não só a alguns dos anos mais negros da história do fogo em Portugal, com os anos de 2003 e 2005 a registarem mais de 400.000ha e 300.000ha de área ardida, respectivamente; mas também a um dos anos (2008) em que menos área ardeu (cerca de 9.000ha) (Quadro 9). Na década de 90, o ano de 1998 foi aquele em que se registou maior área ardida (cerca de 200.000ha), enquanto o ano 1997, pelo contrário, registou menor área ardida (cerca de 20.000ha) (Quadro 8). No entanto, repare-se na diferença de magnitude de incidência do fogo entre as duas “décadas”: se na primeira tem-se um total 900.000ha, na segunda o valor é bastante superior, com um total de quase 1.300.000ha ardidos.

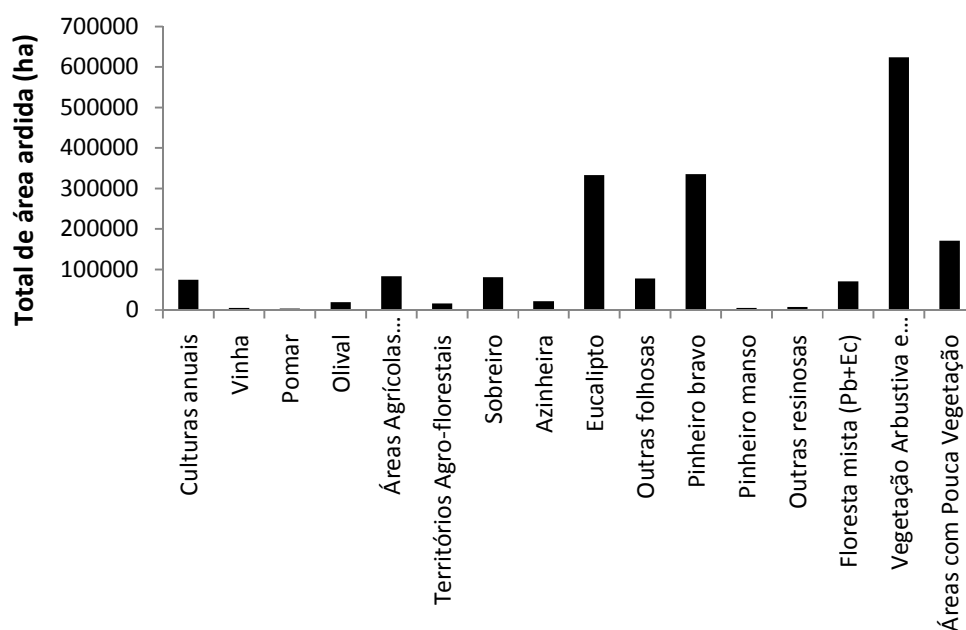


Figura 13 – Total de área ardida no período compreendido entre 1990 e 2008, para as principais classes de ocupação do solo.

Relativamente ao tipo de ocupação do solo que é mais afectado pelos incêndios, durante o período de 19 anos estudado nesta tese, a classe de ocupação do solo que registou maior área ardida foi a de Vegetação Arbustiva e Herbácea com mais de 600.000ha ardidos (24% do total), seguida da classe de Pinheiro bravo com mais de 335.000ha (14% do total) ardidos e da classe

de Eucalipto com mais de 333.000ha ardidos (14% do total). Em oposição, a classe de Pomar, com cerca de 3.600ha ardidos (0,15% do total) e a classe de Vinha, com cerca de 5.300ha ardidos (0,22% do total) foram aquelas em que se registaram os valores mais baixos de área ardida acumulada ao longo do período de tempo estudado, confirmando a pouca contribuição das culturas agrícolas para o total de área ardida (Fig.13). A análise individual de cada um dos dois períodos indica resultados semelhantes: a vegetação arbustiva e herbácea é a classe mais afectada pelos incêndios, seguida do Pinheiro bravo (na primeira década) e do Eucalipto (no segundo período).

As áreas que arderam mais do que uma vez ao longo do período de tempo estudado, representam cerca de 11% do total ardido nestes 19 anos. Na década de 90, estas classes contribuem para cerca de 14% do total ardido, enquanto no período seguinte o valor, baixa para cerca de 9%. Se estas áreas não tiverem sido substituídas por nenhuma cultura ou povoamento, ficando ao abandono, aumenta ainda mais a proporção de área de matos ardida.

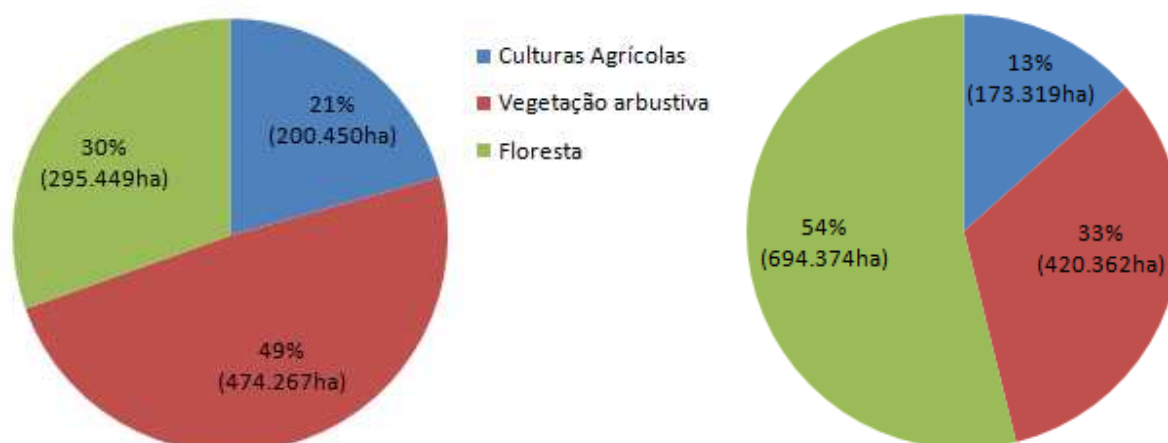


Figura 14 – Total de área queimada agregadas as classes em Floresta, Culturas agrícolas e Vegetação arbustiva, para a década de 90 (esquerda) e para o segundo período (direita).

Considerando as classes agregadas em três grandes grupos, Culturas agrícolas, Vegetação arbustiva e Floresta, na década de 90, a Vegetação arbustiva representou quase metade (49%) da área total ardida, enquanto no período de estudo seguinte (2000-2008), são as florestas que parecem contribuir com mais de metade (54%) da área total ardida (Fig. 14). As classes agrícolas, em ambos os períodos, contribuem com uma pequena percentagem (21% e 13%, respectivamente).

Ocupação do solo	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	Total/ solo (ha)
Culturas anuais	1934	5071	1445	1496	5979	3369	4604	650	10085	2707	37341
Vinha	71	270	40	47	423	379	125	47	410	176	1987
Pomar	83	202	70	21	272	107	135	15	290	109	1304
Olival	444	2514	316	284	1167	1310	851	58	936	777	8656
Áreas agrícolas heterogêneas	1153	3907	683	328	867	1428	536	169	2505	793	12367
Territórios Agroflorestais	780	2197	894	459	990	1084	1020	181	2916	733	11255
Sobreiro	1047	4388	1169	241	1926	2853	1492	90	1835	1028	16067
Azinheira	475	1693	284	207	734	476	363	86	797	307	5422
Eucalipto	2412	14358	3792	2229	982	14117	956	1044	3957	1821	45668
Outras Folhosas	1705	4645	1333	621	2506	3157	2068	471	5471	2460	24435
Pinheiro bravo	9431	49988	8874	13336	7375	26837	11437	2763	26541	9809	166391
Pinheiro manso	134	315	99	295	13	189	8	12	316	108	1488
Outras Resinosas	547	613	169	402	529	525	1371	224	1347	277	6003
Floresta Mista (Pb + Ec)	2042	8270	1966	1169	238	7692	1049	606	5624	1318	29975
Vegetação Arbustiva e Herbácea	41482	50497	10270	16575	46260	42388	35643	7371	59708	19649	329843
Áreas com Pouca Vegetação	48959	10747	1985	5316	10552	11495	11145	2255	19228	5857	127540
Ardido em 1990		484	299	1296	2691	8072	6084	1506	9362	2719	32513
Ardido em 1991			152	525	4608	4744	4203	840	5210	4050	24332
Ardido em 1992				233	341	904	847	355	1750	1087	5517
Ardido em 1993					201	920	2019	597	6417	449	10603
Ardido em 1994						1443	6311	1644	16110	3737	29245
Ardido em 1995							1765	347	13805	2110	18028
Ardido em 1996								546	17593	2365	20505
Ardido em 1997									2253	642	2895
Ardido em 1998										786	786
Total/ano (ha)	113086	161101	34220	45447	88917	134224	94210	21942	215123	66041	974311

Quadro 8 – Área ardida por classe de ocupação do solo entre 1990 e 1999.

Quadro 9 – Área ardida por classe de ocupação do solo entre 2000 e 2008.

Classe de ocupação do solo	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Total/ solo (ha)
Culturas anuais	4945	1582	3267	14074	2781	5266	2880	2059	664	37519
Vinha	456	167	601	916	110	799	76	76	95	3296
Pomar	253	102	230	572	456	397	131	128	30	2300
Olival	726	168	1724	5288	1323	629	364	593	125	10939
Áreas Agrícolas Heterogéneas	9917	4265	9274	25767	5036	11923	940	2596	711	70429
Territórios Agroflorestais	382	422	730	2146	682	243	279	421	15	5320
Sobreiro	1568	1910	3920	37059	21567	2214	4870	314	18	64776
Azinheira	928	1215	1574	10867	3311	213	1313	372	0	15966
Eucalipto	13888	10532	22655	147855	12993	86314	10067	1010	882	287545
Outras Folhosas	10529	8955	5257	16528	5523	10512	11199	699	98	53105
Pinheiro bravo	20093	14355	17841	40866	4094	86099	15558	2457	490	168953
Pinheiro manso	79	596	462	2642	1211	261	130	68	0	4125
Outras Resinosas	555	249	84	214	392	680	161	4	0	1528
Floresta Mista (Ec+Sb)	44	0	81	3808	86	192	120	118	1	4388
Floresta Mista (Pb+Ec)	2269	2161	4329	13673	655	19857	2845	108	60	40961
Vegetação Arbustiva e Herbácea	62828	41822	41285	58795	22735	44661	6066	13132	2699	294022
Áreas com Pouca Vegetação	10758	5650	5244	4418	3456	11260	710	1942	78	43516
Ardido2000		726	8742	11309	6542	13980	3219	1582	802	46902
Ardido2001			1969	5156	3166	12158	2288	1721	98	26556
Ardido2002				4313	5784	16912	3215	1860	217	32301
Ardido2003					691	6129	2128	1104	680	10732
Ardido2004						2234	1754	895	334	5217
Ardido2005							1391	1626	304	3321
Ardido2006								742	367	1109
Ardido2007									203	203
Total/ano (ha)	143886	97666	133204	440025	114974	336569	72636	35824	9003	1290106

4.2 Biomassa

4.2.1 Floresta

Os Quadros 10, 11 e 12 incluem os resultados obtidos seguindo a metodologia descrita em 3.2.1.2, 3.2.1.3 e 3.2.1.4 para a biomassa arbustiva, foliar e de ramos finos, respectivamente. Optou-se por utilizar como descritores estatísticos a mediana e a distância inter-quartis, uma vez que as distribuições destas variáveis são muito assimétricas (anexo II). Também se apresenta a média, embora sendo fortemente influenciada pelos valores mais elevados, para se poder mais facilmente comparar com outros valores encontrados na literatura.

Quadro 10 – Biomassa arbustiva ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) presente nos povoamentos florestais.

Espécie florestal	Média	Mediana	Distância Inter-quartis	Nº de parcelas
Sobreiro	3,09	0,14	4,09	741
Azinhiera	1,80	0,00	1,33	509
Eucalipto	4,96	1,68	5,91	1000
Outras folhosas	6,15	3,14	7,24	215
Pinheiro bravo	8,24	4,45	11,13	1147
Pinheiro manso	3,59	1,28	4,95	99
Outras resinosas	7,05	3,57	10,03	41
Floresta Mista (Pb+Ec)	7,64	3,89	9,58	199
Floresta Mista (Ec+Sb)	4,26	2,76	7,26	10

O valor zero na mediana da classe de Azinhiera deve-se a um elevado número de zeros que caracteriza esta variável e não à possibilidade de existência de números negativos.

Quadro 11 – Biomassa foliar ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) presente nos povoamentos florestais.

Espécie florestal	Média	Mediana	Distância inter-quartis	Nº de parcelas
Sobreiro	0,41	0,32	0,49	772
Azinhiera	0,25	0,21	0,24	582
Eucalipto	3,80	3,40	3,69	890
Outras folhosas	1,42	0,99	1,64	37
Pinheiro bravo	4,26	3,87	3,90	1094
Pinheiro manso	4,85	3,70	4,38	87
Outras resinosas	5,06	4,74	4,23	37
Floresta Mista (Pb+Ec)	4,85	4,69	4,25	229
Floresta Mista (Ec+Sb)	3,29	2,49	2,22	10

Quadro 12 – Biomassa de ramos finos (Mg.ha⁻¹) presente nos povoamentos florestais.

Espécie florestal	Média	Mediana	Distância Inter-quartis	Nº de parcelas
Sobreiro	0,70	0,54	0,82	772
Azinheira	0,42	0,35	0,41	582
Eucalipto	3,06	2,60	3,09	890
Outras folhosas	3,69	2,30	4,86	161
Pinheiro bravo	7,27	5,75	8,14	1094
Pinheiro manso	7,61	6,20	7,86	87
Outras resinosas	7,76	6,08	6,56	23
Floresta Mista (Pb + Ec)	6,55	5,52	7,11	229
Floresta Mista (Ec + Sb)	3,30	2,46	1,84	10

4.2.2 Matos

Após ter sido feito o ajustamento não linear do modelo de Olson aos dados de biomassa arbustiva para Portugal, obteve-se a seguinte equação:

$$W_{arb} = 18,86 (1 - e^{-0.23t})$$

O erro quadrático médio obtido foi cerca de 64 e, portanto, 8 Mg.ha⁻¹, depois de feita a raiz quadrada. Este valor, tendo em conta a média dos dados originais (13 Mg.ha⁻¹) é considerado elevado, estando portanto associada alguma incerteza a esta variável.

Seguindo os passos descritos em **3.2.2.1**, obteve-se **30 anos** como idade média da vegetação arbustiva pertencente à classe “Vegetação Arbustiva e Herbácea”.

No Quadro 13 apresentam-se os resultados obtidos para a biomassa arbustiva (W_{arb}), o rácio de folhas (Rw), a biomassa foliar (BF) e a produção de folhada (PF) nas classes dominadas por matos. A produção média de folhada ($L = 2,64 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) é dada pela média dos valores de produção anual de folhada para todas as classes. Recorrendo ao valor dado por Simões *et al.* (2001) de decomposição ($K = 0,6$) determinou-se a acumulação de folhada (X). A última coluna refere-se ao valor final, depois de multiplicado pelo valor médio de percentagem de coberto do solo (50%) da folhada.

Quadro 13 – Biomassa arbustiva, rácio de folhas, biomassa foliar, produção de folhada e acumulação de folhada para diferentes idades de vegetação.

Idade (anos)	W_{arb} (Mg.ha ⁻¹)	Rw	BF	PF	X	Folhada (Mg.ha ⁻¹)
1	3,86 ± 0,66	36,07	1,39	1,59	2,43	1,21
2	6,93 ± 1,03	31,26	2,17	2,47	3,76	1,88
3	9,38 ± 1,18	28,01	2,63	2,99	4,50	2,25
4	11,32 ± 1,20	25,74	2,91	3,31	4,90	2,45
5	12,86 ± 1,15	24,11	3,10	3,53	5,12	2,56
6	14,09 ± 1,07	22,92	3,23	3,67	5,24	2,62
7	15,07 ± 1	22,03	3,32	3,78	5,30	2,65
8	15,84 ± 0,96	21,36	3,38	3,85	5,34	2,67
9	16,46 ± 1,02	20,84	3,43	3,90	5,36	2,68
30	18,84 ± 1,71	19,03	3,59	4,08	6,80	3,40

Repare-se que entre as idades 9 e 30 anos se regista uma acumulação muito inferior à dos primeiros anos, tal fica a dever-se ao carácter assintótico desta variável. Ou seja, nos primeiros anos, regista-se um acréscimo anual muito mais elevado, que vai decrescendo à medida que a comunidade arbustiva vai amadurecendo.

4.3 Análise de incerteza e de sensibilidade

Seguidamente apresenta-se a informação sobre a que distribuição estatística teórica é que as variáveis, sujeitas ao teste do qui-quadrado, foram ajustadas e os respectivos parâmetros (Quadro 14). Os gráficos com os ajustamentos relativos à biomassa arbustiva, biomassa foliar e de ramos finos nas classes de floresta podem ser consultados no (anexo II).

Quadro 14 – Variáveis ajustadas e respectivos parâmetros do ajustamento.

Biomassa	Espécie Florestal	Distribuição ajustada	Parâmetro escala	Parâmetro forma
Arbustiva	Sobreiro	Gamma	10,73	0,29
	Azinheira	Não passou no teste do qui-quadrado (Discreta)		
	Eucalipto	Gamma	15,56	0,32
	Outras folhosas	Gamma	13,47	0,46
	Pinheiro bravo	Gamma	12,66	0,65
	Pinheiro manso	Gamma	8,40	0,43
	Outras resinosas	Gamma	10,04	0,70
	FM (Pb+Ec)	Não passou no teste do qui-quadrado (Discreta)		
	FM (Ec+Sb)	Gamma	5,25	0,81
Foliar	Sobreiro	Não passou no teste do qui-quadrado (Discreta)		
	Azinheira	Gamma	0,16	1,59
	Eucalipto	Não passou no teste do qui-quadrado (Discreta)		
	Outras folhosas	Gamma	1,63	0,87
	Pinheiro bravo	Weibull	4,72	1,52
	Pinheiro manso	Weibull	4,96	1,05
	Outras resinosas	Weibull	5,62	1,47
	FM (Pb+Ec)	Weibull	5,37	1,55
	FM (Ec+Sb)	Weibull	3,72	1,63
Ramos finos	Sobreiro	Não passou no teste do qui-quadrado (Discreta)		
	Azinheira	Gamma	0,26	1,63
	Eucalipto	Weibull	3,26	1,23
	Outras folhosas	Gamma	4,79	0,77
	Pinheiro bravo	Weibull	7,65	1,16
	Pinheiro manso	Weibull	8,00	1,16
	Outras resinosas	Gamma	6,61	1,17
	FM (Pb+Ec)	Weibull	7,01	1,24
	FM (Ec+Sb)	Gamma	0,98	3,38

Repare-se que foram necessárias apenas três distribuições estatísticas (Weibull, Gamma e Discreta) para caracterizar todas as variáveis.

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos da análise de incerteza realizada para os três principais gases com efeito de estufa (CO₂ (Fig. 15), N₂O (Fig. 16) e CH₄ (Fig. 17)). Os resultados para os restantes compostos químicos podem ser consultados no anexo III.

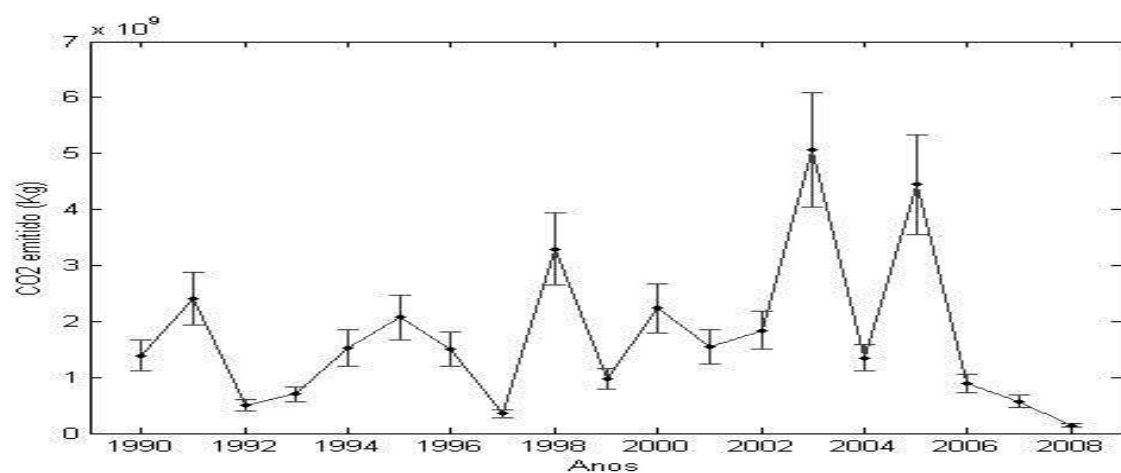


Figura 15 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de CO₂ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

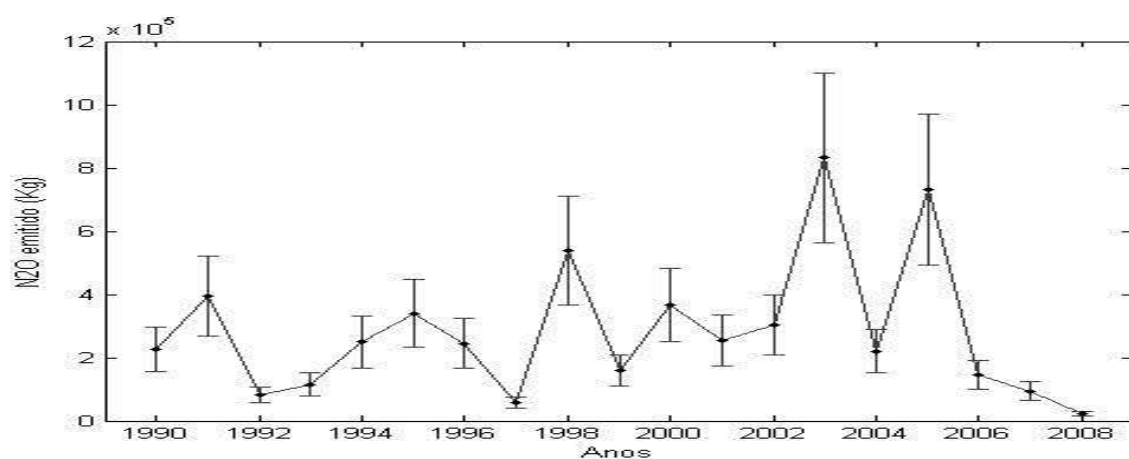


Figura 16 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de N₂O resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

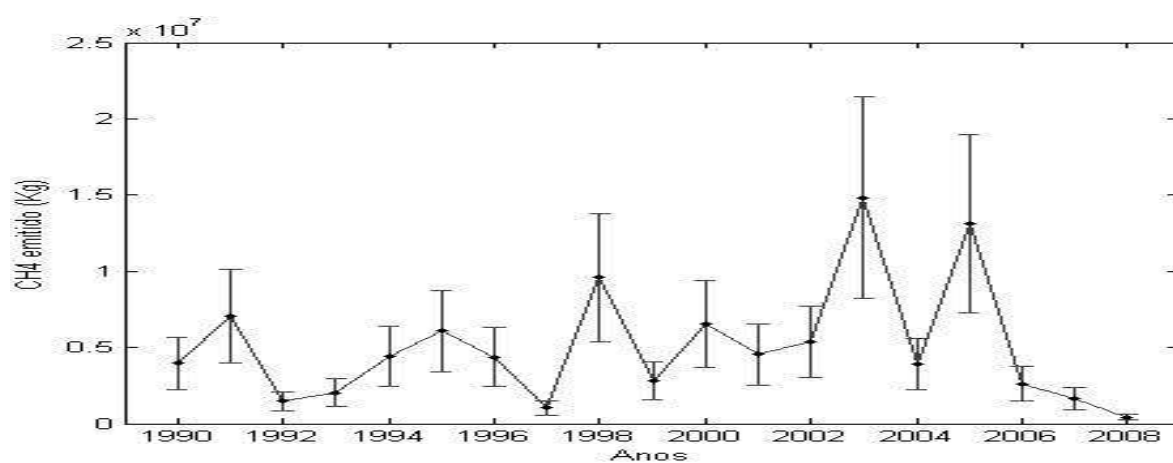


Figura 17 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de CH₄ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

Note-se que os anos de 2003 e 2005 foram aqueles que se registou uma maior quantidade de gases com efeito de estufa emitidos, enquanto que 1997 e 2008 foram os anos em que se registou menor quantidade.

Na análise de sensibilidade, seleccionaram-se apenas as variáveis com impacto superior a 0,1, dado pelo índice de primeira ordem, uma vez que abaixo desse limiar não se considerou que tivessem um impacto significativo na variância do *output*. Em seguida, apresenta-se os resultados obtidos para os três principais gases com efeito de estufa (Fig. 18, 19 e 20). Os resultados obtidos para os restantes compostos químicos podem ser consultados no anexo III.

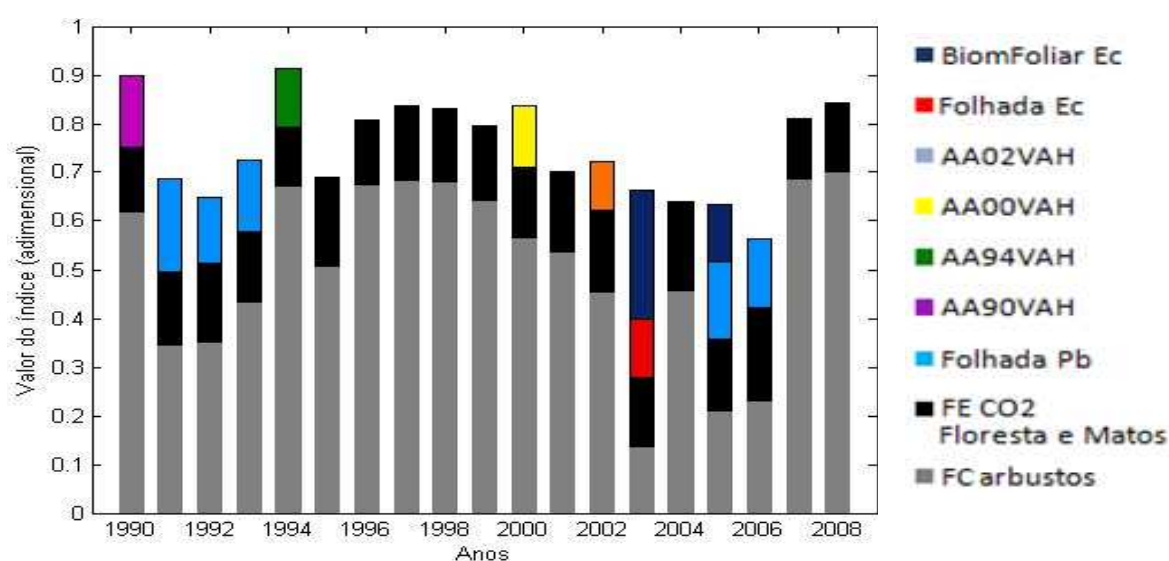


Figura 18 – Análise de sensibilidade das emissões de CO₂ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008 (AA – área ardida; VAH – vegetação arbustiva e herbácea; FE – factor de emissão; FC – factor de combustão).

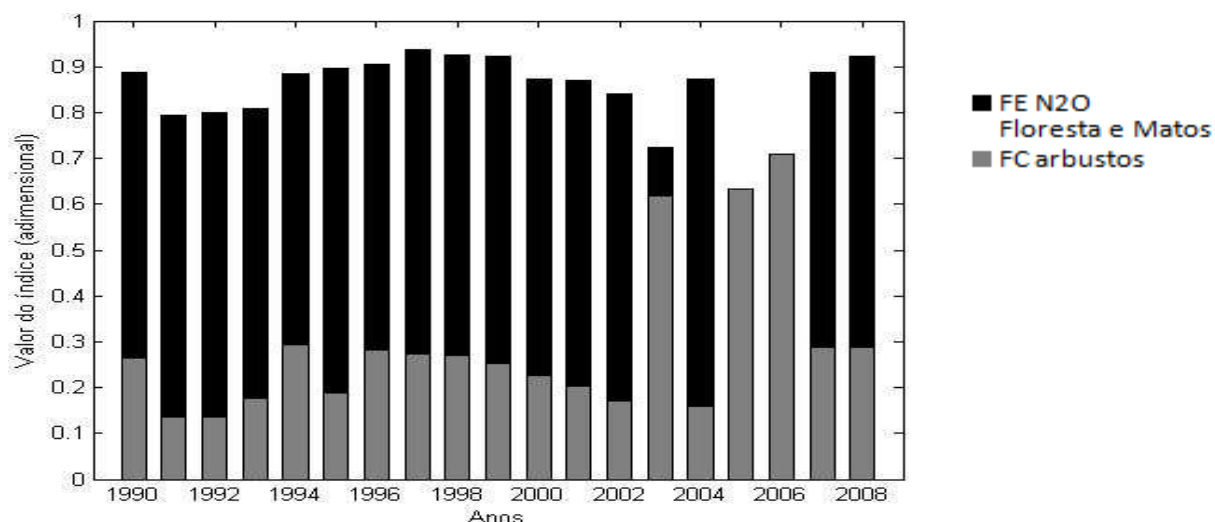


Figura 19 – Análise de sensibilidade das emissões de N₂O resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008 (FE – factor de emissão; FC – factor de combustão).

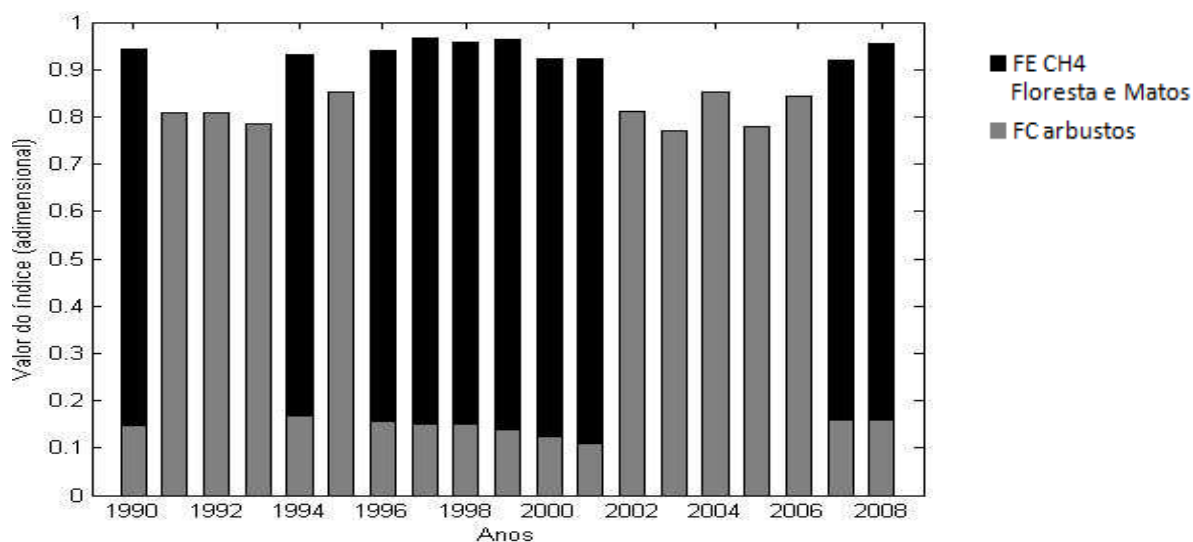


Figura 20 – Análise de sensibilidade das emissões de CH₄ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008 (FE – factor de emissão; FC – factor de combustão).

Repare-se que, em todos os anos e para todos os compostos químicos estudados, existe um número muito reduzido de factores (entre 1 e 4) que contribuem para a grande maioria da variância encontrada no resultado do modelo, ficando muito pouco a dever-se às interações entre factores.

Em seguida apresenta-se, a título de exemplo, os valores dos índices de primeira ordem e os índices totais de sensibilidade para as 54 variáveis utilizadas no cálculo das emissões de

CO₂ no ano de 1990 (Quadro 15). Como os resultados eram muito semelhantes (em cada ano e para cada gás) e seria muito exaustivo, com pouco ganho de informação, inserir todos os Quadros nesta tese, optou-se apenas por uma, para se compreender a informação dada por estes índices.

Quadro 15 – Índices de sensibilidade (primeira ordem e totais) para as emissões de CO₂, em 1990 (A.A. – área ardida; biom. – biomassa; F.C. – factor de combustão; F.E. – factor de emissão; Or – Outras resinosas; Of – Outras folhosas; FM – floresta mista; VAH – vegetação arbustiva e herbácea; TAF – territórios agro-florestais; AAH – áreas agrícolas heterogêneas; APV – áreas com pouca vegetação).

Variável	S	ST	Variável	S	ST
<u>F.C. folhada</u>	<u>0,0000</u>	<u>0,0849</u>	Sb biom. ramos	0,0000	0,0000
<u>F.C. arbustos</u>	<u>0,6201</u>	<u>0,6309</u>	Sb biom. folhas	0,0000	0,0000
F.C. folhas	0,0000	0,0006	Sb biom. arbustos	0,0000	0,0000
F.C. ramos	0,0000	0,0001	A.A. 90 Sobreiro	0,0000	0,0000
<u>F.E. CO2 floresta e matos</u>	<u>0,1315</u>	<u>0,1481</u>	Pm biom. ramos	0,0000	0,0000
F.E. CO2 agrícolas	0,0021	0,0006	Pm biom. folhas	0,0000	0,0000
Or biom. folhada	0,0000	0,0001	Pm biom. arbustos	0,0000	0,0000
Or biom. ramos	0,0000	0,0000	A.A. 90 Pinheiro manso	0,0000	0,0000
Or biom. folhas	0,0000	0,0000	PbEc biom. folhada	0,0039	0,0011
Or biom. arbustos	0,0000	0,0000	PbEc biom. ramos	0,0000	0,0000
A.A. 1990 Outras Resinosas	0,0001	0,0000	PbEc biom. folhas	0,0003	0,0000
Of biom. folhada	0,0001	0,0001	PbEc biom. arbustos	0,0068	0,0033
Of biom. ramos	0,0000	0,0000	A.A. 90 FM (Pb+Ec)	0,0000	0,0002
Of biom. folhas	0,0002	0,0000	<u>VAH biom. arbustos</u>	<u>0,0192</u>	<u>0,0230</u>
Of arbustos	0,0000	0,0000	A.A. 90 VAH	0,1484	0,1454
A.A. 90 Outras Folhosas	0,0002	0,0000	A.A. 90 TAF	0,0000	0,0000
Az biom. folhada	0,0000	0,0000	A.A. 90 Pomar	0,0000	0,0000
Az biom. ramos	0,0005	0,0001	A.A. 90 Olival	0,0000	0,0000
Az biom. folhas	0,0002	0,0003	A.A. 90 AAH	0,0000	0,0000
Az biom. arbustos	0,0003	0,0000	A.A. 90 APV	0,0013	0,0011
A.A. 90 Azinheira	0,0000	0,0000	A.A. 90 Vinha	0,0000	0,0000
<u>Pb biom. folhada</u>	<u>0,0139</u>	<u>0,0223</u>	A.A. 90 Culturas Agrícolas	0,0001	0,0000
Pb biom. ramos	0,0000	0,0000	Ec biom. folhada	0,0004	0,0005
Pb biom. folhas	0,0000	0,0002	Ec biom. ramos	0,0000	0,0000
Pb biom. arbustos	0,0002	0,0000	Ec biom. folhas	0,0026	0,0009
A.A. 90 Pinheiro bravo	0,0000	0,0007	Ec biom. arbustos	0,0001	0,0000
Sb biom. folhada	0,0000	0,0001	A.A. 90 Eucalipto	0,0002	0,0001

As variáveis a *bold* são aquelas que, tendo um índice de primeira ordem superior a 0,1, são consideradas importantes. Por outro lado, as variáveis sublinhadas são aquelas que têm um

ST superior ao S e, como tal, interagem com outras. Nalguns casos registam-se as duas situações simultaneamente.

Grande parte dos índices das variáveis aproxima-se de zero, querendo isto dizer que a maior parte destas variáveis tem pouca influência no resultado do modelo, sendo este afectado, principalmente, por três ou quatro factores.

5. Discussão

5.1 Área ardida por classe de ocupação do solo

O fogo é um elemento essencial da paisagem mediterrânica. Como tal, todos os anos, Portugal regista vários episódios de ocorrência de fogos, com especial incidência nos meses de Verão (mais quentes e secos). Contudo, a área ardida varia muito de ano para ano. Para o período de tempo estudado nesta tese, os anos de 2003 e 2005 tiveram forte influência nos resultados, dada a quantidade anómala de área que ardeu nesses mesmos anos. Assim, não é de estranhar que entre 2000 e 2008 se registre um total de área ardida muito superior àquele que se verificou na década anterior.

Os valores obtidos para as classes de Pinheiro bravo e de Eucalipto resultam, principalmente, dos anos de 2003 e 2005, com áreas muito significativas destas espécies a serem afectadas. Note-se que este aspecto contribuiu para um aumento da percentagem de floresta que arde no segundo período de estudo (2000 a 2008), em comparação com a década de 90. No entanto, a vegetação arbustiva e herbácea, ao longo dos 19 anos analisados nesta tese, é a classe que mais contribuiu para a área total ardida. Com estes resultados facilmente se percebe a forte contribuição dos matos para o total de área ardida em cada ano, e o porquê de o título desta tese se referir a fogos de vegetação e não apenas a fogos florestais.

Os resultados aqui obtidos relativamente às áreas de Pinheiro bravo e Eucalipto são também importantes do ponto de vista económico, uma vez que estas duas espécies originam riqueza para o país. Sendo fortemente afectadas pelo fogo, é importante definir estratégias que possam minimizar os danos causados pelos incêndios. Relativamente às áreas de mato, embora não tendo a importância económica das espécies florestais referidas, funcionam muitas vezes como veículo de transporte do fogo para o interior de povoamentos florestais, dada a facilidade de propagação do fogo neste tipo de vegetação. Como tal, é importante evitar o abandono de grandes áreas de mato, ou antigas zonas agrícolas e florestais, pois levam à acumulação de quantidades extraordinárias de combustível, tornando-se pontos de partida para os grandes incêndios.

5.2 Biomassa no grupo Floresta

5.2.1 Biomassa arbustiva

Em relação à biomassa arbustiva no grupo da Floresta, é a classe de Pinheiro bravo que apresenta o valor mais elevado, podendo estar relacionado com o abandono de muitos destes povoamentos no Centro de Portugal, o que leva à acumulação de grandes

quantidades de combustível no subcoberto. Na literatura encontra-se uma grande variedade de valores, como por exemplo, em Fernandes *et al.* (2004), onde o autor apresenta um valor bem mais elevado do que aquele que aqui foi obtido, com 45,46 Mg.ha⁻¹ de total de combustível fino (arbustos mais folhada), em povoamentos não sujeitos a tratamento de redução de combustível. Por outro lado, em povoamentos sujeitos a este tratamento obteve valores entre as 11 e as 36 Mg.ha⁻¹, consoante tivesse passado mais ou menos tempo desde o tratamento.

Noutro estudo do mesmo autor (Fernandes *et al.*, 2002), é também apresentado um intervalo largo de valores (0,1 a 20,8 Mg.ha⁻¹), com uma média de 6,1 Mg.ha⁻¹ para povoamentos no Norte de Portugal. Mais recentemente, Fernandes e Rigolot (2007) apresentam um valor médio de 15 Mg.ha⁻¹ para a vegetação arbustiva nos povoamentos de Pinheiro bravo.

Cruz e Viegas (2001) apresentam valores de total de combustível de superfície (arbustos mais folhada) para um povoamento de Pinheiro bravo (42 Mg.ha⁻¹) e para um povoamento de Eucalipto (13,1 Mg.ha⁻¹). Embora significativamente mais elevados do que os valores determinados nesta tese (8,24 e 4,96 Mg.ha⁻¹, respectivamente), a tendência é semelhante, com os povoamentos de Pinheiro bravo a apresentarem valores de acumulação de combustível de superfície bem mais elevados do que os povoamentos de Eucalipto.

Importa referir que, na maior parte dos casos, os valores discutidos na literatura, se referem a uma localização específica do país, enquanto os valores determinados e discutidos nesta tese pretendem ser uma representação dos povoamentos a nível nacional.

A nível nacional pode-se comparar os valores aqui obtidos com aqueles que são apresentados em Silva *et al.* (2006), que utilizou os dados do IFN95 para fazer os cálculos da biomassa arbustiva (2.336 parcelas). Os resultados obtidos, em termos qualitativos são semelhantes: por um lado as Florestas Mistas, as Outras Resinosas e o Pinheiro Bravo são as classes que apresentam os valores mais elevados e, por outro, as classes de Azinheira, Sobreiro e Eucalipto apresentam os valores mais baixos. Contudo, existe uma tendência geral dos resultados obtidos nesta tese serem ligeiramente inferiores àqueles que são apresentados pelo autor referido anteriormente. Tal pode ficar a dever-se ao facto de as medições feitas no IFN0506 (6897 parcelas), terem sido feitas depois dos dois piores anos de incêndios em Portugal (2003 e 2005), existindo, certamente, muitas comunidades arbustivas que ainda não atingiram a maturidade.

Para além do estudo feito por Silva *et al.* (2006), apenas se encontrou mais um trabalho onde são caracterizados os povoamentos a nível nacional. Fernandes *et al.* (2006)

apresenta uma série de modelos de combustível para as espécies florestais características em Portugal, sendo a biomassa arbustiva, um dos parâmetros considerados. Uma vez mais, é o Pinheiro bravo que apresenta os valores mais elevados (entre 0,90 e 6,35 Mg.ha⁻¹), com o Eucalipto e o Sobreiro a apresentarem valores mais baixos (entre 0,49 e 4,02 Mg.ha⁻¹ e entre 0,56 e 4,39 Mg.ha⁻¹, respectivamente). Pode dizer-se que a biomassa arbustiva determinada nesta tese se encontra próxima destes valores, sendo ligeiramente mais elevada para o Pinheiro bravo (8,24 Mg.ha⁻¹) e para o Eucalipto (4,96 Mg.ha⁻¹). Também apresentam valores para outros Carvalhos e para a Acácia, que podem ser comparados com aqueles aqui descritos para as Outras folhosas. O valor determinado nesta tese (6,15 Mg.ha⁻¹), tal como para as espécies anteriores, encontra-se um pouco acima daquele que é apresentado pelo autor (2,48 a 4,89 Mg.ha⁻¹).

5.2.2 Biomassa foliar e de ramos finos

Uma vez que os valores apresentados na bibliografia se referem, maioritariamente, a valores de biomassa da copa (folhas e ramos), optou-se por fazer a discussão conjunta destas duas componentes da biomassa.

No caso da biomassa foliar e de ramos finos, estando calculadas em massa por unidade de área, os valores são fortemente influenciados pela densidade dos povoamentos. Como tal, para espécies como o Pinheiro bravo ou o Eucalipto (11,53 e 6,86 Mg.ha⁻¹), os valores são bem mais elevados, do que os do Sobreiro ou da Azinheira (1,11 e 0,67 Mg.ha⁻¹), o que se percebe facilmente, tendo em conta as características dos povoamentos (e não das árvores) destas espécies (povoamentos densos *versus* montados).

Na literatura não se encontram muitas referências a valores de biomassa das copas para as principais espécies florestais portuguesas. Contudo, tal como para a biomassa arbustiva, no caso do Pinheiro bravo, existem alguns estudos, como o de Fernandes *et al.* (2002) que apresentam um intervalo largo de variação de valores (0,2 a 10,9 Mg.ha⁻¹), para povoamentos no Norte de Portugal; ou o de Fernandes e Rigolot (2007) que apresentam um valor médio de 16 Mg.ha⁻¹.

Mais uma vez, a nível nacional, apenas se encontraram os valores de biomassa foliar disponibilizados por Silva *et al.* (2006), aqui sem qualquer referência a biomassa de ramos. Este autor determinou as biomassas foliares para o Pinheiro bravo, o Eucalipto e a Floresta Mista de Pinheiro bravo e Eucalipto, sendo a informação para as outras espécies dada por EEA (1999). Os valores determinados nesta tese são tendencialmente inferiores aos calculados pelo autor referido.

Para as restantes espécies florestais, os valores disponibilizados EEA (1999), aparentemente, não têm em conta as densidades dos povoamentos, obtendo valores muito elevados para o Sobreiro e a Azinheira (5 e 3,2 Mg.ha⁻¹, respectivamente), relativamente àqueles que são calculados nesta tese. Os valores para o Pinheiro manso e para as Outras resinosas são bastante semelhantes, enquanto o valor para as Outras folhosas é bastante mais elevado do que aquele que foi calculado nesta tese. A determinação deste último valor está condicionada pela falta de equações de biomassa foliar para as espécies florestais portuguesas, levando a que apenas se pudesse determinar esta componente da biomassa nas árvores de 37 parcelas do IFN0506.

5.3 Biomassa no grupo Matos

5.3.1 Biomassa arbustiva

Em relação à biomassa arbustiva no grupo Matos, os resultados aqui obtidos encontram-se dentro do intervalo de variação de valores apresentados na literatura por diversos autores, tanto para a classe Vegetação Arbustiva e Herbácea (18,84 Mg.ha⁻¹), cuja idade média da vegetação foi determinada (30 anos); como para as classes das áreas que arderam mais do que uma vez (entre 3,86 e 16,46 Mg.ha⁻¹), ao longo do período de tempo estudado, e nas quais se sabe a idade à partida (entre 1 e 9 anos).

Uma vez mais, a variabilidade de valores encontrada na literatura é muito grande, o que facilmente se percebe graças à variedade de espécies de matos em Portugal, bem como das diferentes idades destas comunidades. Vega *et al.* (2006) apresenta valores elevados (entre 15 e 45 Mg.ha⁻¹) de biomassa arbustiva para matagais (*Erica sp.*, *Ulex sp.*, *Chamaespartium tridentatum*) no Noroeste da Península Ibérica (Trás-os-Montes e Galiza). Viegas *et al.* (1998) apresentam, para matagais das mesmas espécies, valores inferiores de biomassa arbustiva (entre 10 e 17 Mg.ha⁻¹).

Repare-se no grande intervalo de variação que é apresentado por Fernandes *et al.* (2000), de 4,9 a 64,9 Mg.ha⁻¹, para vários tipos de matagais mediterrânicos, dominados por *Erica sp.*, e *Chamaespartium tridentatum*, no Nordeste de Portugal, com 5, 14 e 18 anos de idade. Para outras idades são também referidos valores em Fernandes *et al.* (1998) para comunidades com 3 (0,61 Mg.ha⁻¹), 6 (3,57 Mg.ha⁻¹) ou 12 meses (6,52 Mg.ha⁻¹), e também para matagais mais maduros (23,91 Mg.ha⁻¹). O valor apresentado, por este autor, para matagais de um ano de idade (12 meses) é bem mais elevado do que aquele que foi determinado, com recurso à equação nacional de acumulação de biomassa, que foi ajustada nesta tese (3,86 Mg.ha⁻¹). Tal pode ficar a dever-se ao facto do valor referido em Fernandes *et al.* (1998) ser específico de uma região, enquanto o valor aqui determinado resulta de

uma equação que integra a variabilidade a nível nacional. Por outro lado, o valor apresentado por Fernandes *et al.* (2000c) para matagais com 5 anos de idade é bastante inferior àquele que aqui foi determinado (4,9 contra 12,86 Mg.ha⁻¹).

Também se encontram valores de biomassa arbustiva para comunidades de outros países do Mediterrâneo como a Turquia, onde Saglam *et al.* (2008) apresentam um intervalo (7 a 67,4 Mg.ha⁻¹) e um valor médio (28,8 Mg.ha⁻¹) de biomassa arbustiva para vegetação típica (como *Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*).

Toda esta variabilidade de observações, reforça ainda mais a importância de não entrar no modelo de cálculo das emissões, a nível nacional, apenas com um valor fixo para esta variável, uma vez que seria bastante redutor e não representaria a diversidade que se pode verificar no terreno.

Comparando com os resultados obtidos por Silva *et al.* (2006), que fez um estudo muito semelhante, mas com recurso a uma equação de acumulação de biomassa diferente (Rambal, 2001), os resultados obtidos nesta tese são consideravelmente superiores, contudo, mais próximos dos que se encontram na bibliografia para comunidades arbustivas em Portugal.

5.3.2 Acumulação de folhada

No que respeita à acumulação de folhada nas comunidades arbustivas distribuídas por Portugal, os valores determinados nesta tese com recurso ao modelo desenvolvido por Olson (1963), encontram-se dentro do intervalo de variação de valores referidos na literatura.

Nas classes que ardem mais do que uma vez, com idades entre os 1 e os 9 anos, a acumulação de folhada varia entre 1,21 e 2,68 Mg.ha⁻¹, enquanto na classe de Vegetação Arbustiva e Herbácea estimou-se 3,4 Mg.ha⁻¹. Estes resultados assemelham-se aos observados por Dimitrakopoulos (2002) em diversos matagais na Grécia, com valores de acumulação de folhada entre 0,7 e 3,4 Mg.ha⁻¹. Também Saglam *et al.* (2008) apresentam um intervalo (0 a 12,4 Mg.ha⁻¹) e um valor médio (4,4 Mg.ha⁻¹) de acumulação de folhada para comunidades arbustivas típicas da Turquia.

De Luis *et al.* (2004) apresentam valores de acumulação de folhada mais elevados (9,24, 18,17 e 18,96 Mg.ha⁻¹) do que aqueles que aqui foram calculados, para comunidades arbustivas (*U. parviflorus*, *C. albidus* e *R. officinalis*) com cerca de 12 anos, no Este de Espanha.

Uma vez mais, os resultados obtidos são superiores àqueles que são referidos em Silva *et al.* (2006). Tal fica a dever-se à relação estabelecida entre a acumulação de folhada e a biomassa arbustiva. Uma vez que, como já foi referido, os resultados da secção anterior são superiores, é inevitável que também aqui o sejam, dado que se estabeleceu uma relação directa entre estas duas variáveis.

Em Espanha, e para valores de acumulação de combustível (folhada mais arbustos) em comunidades dominadas por *Ulex parviflorus*, com diferentes idades (3, 9 e 12 anos), Baeza *et al.* (2002) referem valores algo semelhantes, sobretudo nas comunidades de 3 anos (entre 10 e 16 Mg.ha⁻¹). Para as comunidades de 9 anos, observaram valores entre 35 e 40 Mg.ha⁻¹; e para as de 12 anos entre 26 e 46 Mg.ha⁻¹. Aqui os resultados já são ligeiramente mais elevados do que aqueles que foram determinados nesta tese. Noutro país mediterrânico (Turquia), Saglam *et al.* (2008) apresentam valores de total de biomassa (folhada mais arbustos) para vegetação típica (como *Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*) entre 24,7 e 51,3 Mg.ha⁻¹, com uma média de 34,8 Mg.ha⁻¹.

5.4 Análise de incerteza e de sensibilidade

Depois de discutidos os valores de área ardida e de biomassa torna-se ainda mais evidente a dificuldade que é apresentar uma variável, que retrata uma situação a nível nacional, com um único valor, tendo em conta a enorme variabilidade que existe. Deste modo, se percebe a necessidade de realizar a análise de incerteza dos resultados do modelo utilizado.

Pela observação das figuras 15, 16 e 17 é fácil perceber a incerteza associada à estimativa das emissões de gases com efeito de estufa, resultantes dos fogos de vegetação. A análise de incerteza aqui realizada é a primeira para estudos deste género e como tal, não existem na literatura referências com as quais se possam comparar os resultados obtidos.

Pode-se também observar como os anos de 2003, 2005 e 2008 foram anómalos, os dois primeiros pelos impactos negativos e quantidade extrema de emissões e o último pela quantidade mínima de emissões (resultante da pouca área ardida). Pode-se ainda perceber que o CO₂ é, em cada ano, o gás que é libertado em maior quantidade. Contudo, são também emitidas quantidades significativas de outros gases, como o CH₄ e o N₂O, que têm um potencial de aquecimento global muito superior ao do CO₂.

Relativamente à análise de sensibilidade aqui realizada, é também um estudo pioneiro para este modelo de emissões. A sua complexidade deriva sobretudo do elevado número de variáveis em estudo (441 no total dos anos).

Pela observação das figuras 18, 19 e 20 facilmente se percebe a forte contribuição, em todos os anos e para todos os gases, de poucas variáveis ($S_i > 0,1$) para a variância do resultado do modelo, com o factor de emissão do gás (floresta e matos) e o factor de combustão dos arbustos a desempenharem um papel muito importante. Tal pode ficar a dever-se à especial incidência dos fogos neste tipo de ocupação do solo.

Outro aspecto importante é que apenas uma pequena percentagem (10 - 20%) da variância do resultado do modelo, resulta das interacções entre as variáveis, ou seja, entre 80 a 90% da variância resulta de efeitos singulares das variáveis referidas anteriormente. Pode-se comprovar esta situação, para o exemplo apresentado no Quadro 15, somando todos os índices de primeira ordem e verificando que pouco falta para totalizar o valor 1. Também se pode verificar, que a maior parte das variáveis poderia ser fixada num valor constante dentro do seu espaço de incerteza, sem que isso afectasse o resultado do modelo, uma vez que o seu efeito singular é quase nulo ($S_i \approx 0$), bem como o seu efeito conjugado com os outros factores ($ST_i \approx 0$). Pode-se ainda observar que existem poucos factores a interagir com outros ($ST_i > S_i$, aqueles que estão sublinhados) e que mesmo aqueles que interagem, interagem numa dimensão muito pequena (sempre menor que 0,02).

O parâmetro que mais interage com outras variáveis, neste caso, é o factor de combustão da folhada, que presumivelmente interage com todos os outros factores sublinhados. Das variáveis consideradas importantes (negrito), duas delas têm interacção com outras variáveis, num grau muito pequeno, e o outro não.

Comparando com os valores de emissões de gases com efeito de estufa obtidos por Silva *et al.* (2006), que realizou o seu estudo para a década de 90, os valores aqui determinados (em média) são ligeiramente inferiores, mas dentro da mesma ordem de grandeza. Para se estabelecer esta comparação, foi necessário converter os valores obtidos para CO_2 equivalentes, utilizando o potencial de aquecimento global (PAG) apresentado no Quadro 16, dos três principais gases de efeito de estufa (Pereira *et al.*, 2009). Por exemplo, para o ano 1990 a estimativa aqui feita indica que foram emitidas, em média, cerca de 1540 Gg de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ de gases com efeito de estufa (CO_2 , N_2O e CH_4), enquanto Silva *et al.* (2006), apresentam um valor de 1640 Gg de $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

Quadro 16 – Potencial de aquecimento global dos três principais gases de efeito de estufa.

Composto químico	PAG
CO_2	1
CH_4	21
N_2O	310

É interessante comparar as emissões resultantes dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, durante o período de tempo compreendido entre 1990 e 2007, com outras fontes de poluentes.

A principal fonte de gases com efeito de estufa em Portugal é, sem dúvida, o sector energético (transportes e indústria energética), sendo responsável, neste período, por entre 74 a 79% das emissões, todos os anos. Neste sector são sobretudo os transportes que dão a maior contribuição (Pereira *et al.*, 2009). Existem também outros sectores da economia que são importantes emissores de gases com efeito de estufa, como os processos industriais (transformação química e física de matérias-primas), que representam entre 8 a 12% ou a agricultura (fermentação entérica associada à pecuária e solos agrícolas) que representa entre 9 a 15%. Neste cenário, as emissões resultantes dos incêndios em Portugal representam entre 1 a 7% do total, em cada ano, uma quantidade muito significativa quando comparada com os outros sectores da economia.

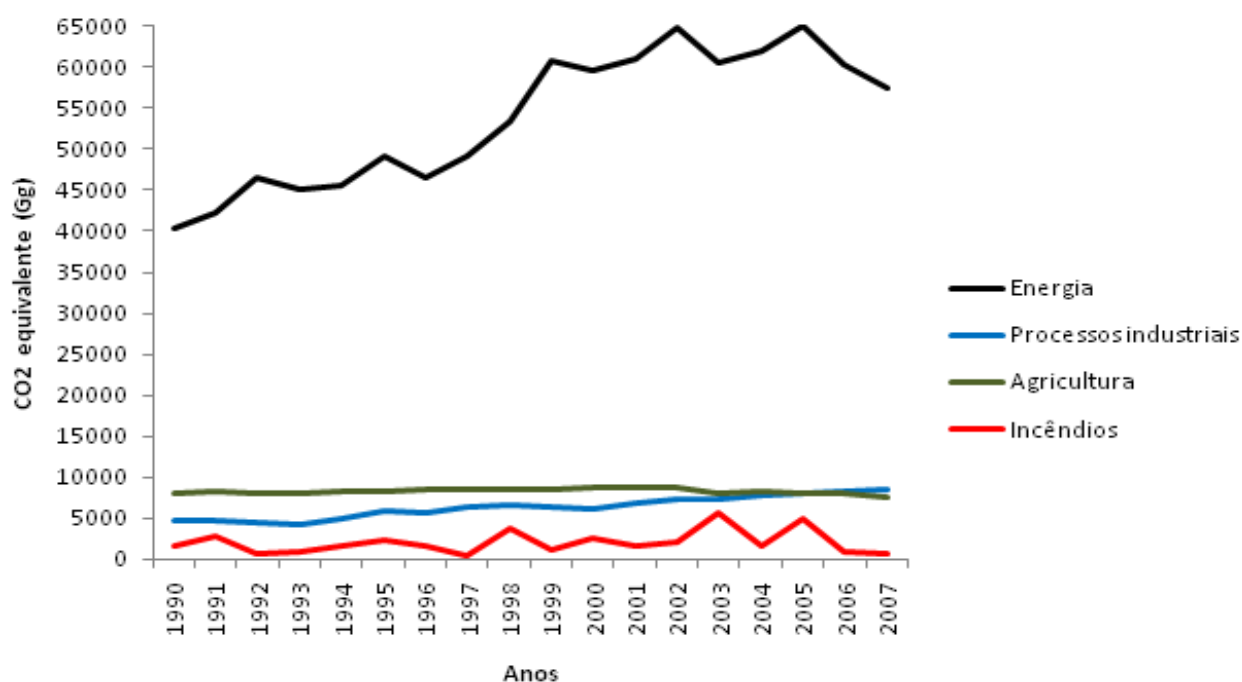


Figura 21 – Comparação entre as emissões de gases de efeito de estufa (CO₂, N₂O e CH₄) de diversos sectores, em Portugal, entre 1990 e 2007.

Repare-se que nos anos em que se registou maior área ardida (2003 e 2005, principalmente) as emissões chegaram quase ao mesmo nível das de sectores como a agricultura e os processos industriais.

Contudo, importa referir uma grande diferença entre as emissões dos incêndios e as dos sectores de actividade. As primeiras concentram-se, maioritariamente, num pequeno

período do ano (meses de Verão), ao passo que as outras são contínuas ao longo do ano. Isto pode ter impactos importantes na atmosfera, uma vez que em pouco tempo são injectadas grandes quantidades de gases e aerossóis. Por outro lado, enquanto as emissões resultantes de actividades industriais, do sector energético e da agricultura são necessárias, pois à partida resultam de processos que geram riqueza para o país, as emissões resultantes dos fogos resultam de um fenómeno natural que, fazendo parte da paisagem mediterrânica, não deixa de destruir um património natural valioso.

6. Conclusões

Este trabalho pretendeu estimar as emissões resultantes dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008 e, simultaneamente, avaliar a magnitude e origem das incertezas associadas ao cálculo destas estimativas. Neste sentido, as técnicas de análise de incerteza e de sensibilidade são ferramentas valiosas. É certo que a informação recolhida para as diferentes variáveis que integram o modelo, não é perfeita e é, sobretudo, muito variável. A análise de incerteza aqui realizada permitiu confirmar que as estimativas obtidas pela aplicação do modelo de Seiler e Crutzen (1980) são fortemente influenciados pelas incertezas associadas a cada uma das variáveis. Posteriormente, a análise de sensibilidade permitiu identificar os factores que maiores oscilações provocam no resultado do modelo.

A área ardida por tipo de ocupação do solo não se revelou ser decisiva para a variabilidade do *output* do modelo. Contudo, percebe-se facilmente a necessidade de uma determinação adequada desta variável: se arde, emite. Neste aspecto, a detecção remota desempenha um papel fundamental e integra praticamente todos os estudos feitos nesta área, quer a nível regional como global (e.g. Barbosa *et al.*, 1999, van der Werf *et al.*, 2006). A limitação de não detectar áreas ardidas inferiores a 5ha (Pereira *et al.*, 2006) não se revela significativa, uma vez que a grande maioria da área ardida é causada pelos fogos de grandes dimensões (Strauss, 1989), sendo estes facilmente detectados por imagem de satélite. Por outro lado, a caracterização da ocupação do solo revela algumas limitações, uma vez que a resolução espacial difere da COS para a CORINE. Percebe-se a dificuldade de uma caracterização anual da ocupação do solo, devido ao carácter dinâmico da vegetação e à acção do Homem, contudo, sendo a COS de 1990 e, tendo passado praticamente 20 anos, seria útil actualizar esta carta que é bem mais rigorosa do que a CORINE.

No que respeita ao cálculo das biomassas, enquanto para as classes de Floresta existe o IFN que é uma importante fonte de informação (ainda que com algumas limitações), para as restantes classes, a informação é mais escassa (caso das classes dos Matos) ou inexistente (caso das classes agrícolas). No caso das classes agrícolas, por falta de informação, nem sequer foi possível integrar as variáveis relativas à biomassa na análise de incerteza e sensibilidade.

Dentro das classes de Floresta, existe também uma grande diferença no grau de conhecimento sobre as diferentes espécies florestais características de Portugal. Se, no caso no Pinheiro bravo e do Eucalipto, a informação relativamente às biomassas é abundante, o mesmo não se pode dizer de espécies como o Pinheiro manso, o Sobreiro ou

a Azinheira. Embora haja uma menor incidência do fogo nestes povoamentos (ou montados), seria interessante e, sobretudo melhoraria os resultados do modelo, se existisse maior conhecimento em relação a estas espécies.

Seria importante investir no estudo da biomassa nas classes de Matos, pelos resultados obtidos tanto na determinação da área ardida por tipo de ocupação do solo, onde se concluiu ser a classe com maior incidência do fogo; como também, posteriormente, pela análise de sensibilidade, onde o factor de combustão dos arbustos revelou ser uma variável fundamental. Se, por um lado, o modelo de Olson (1963) é amplamente utilizado em estudos de acumulação de folhada, já a equação que aqui foi ajustada para a acumulação de biomassa arbustiva, mesmo integrando dados recolhidos a nível nacional, carece de avaliação futura, pois apresenta ainda um erro associado elevado.

Relativamente aos factores de combustão existe ainda pouca informação para as espécies mais características de Portugal (excepto para o Pinheiro bravo). Dos resultados obtidos na análise de sensibilidade percebe-se ainda mais a importância de investir numa melhor caracterização desta variável. Seria muito interessante e um contributo valioso para a melhoria das estimativas das emissões resultantes dos fogos de vegetação se existisse, para Portugal, por exemplo, um estudo semelhante ao desenvolvido por Campbell *et al.* (2007), onde o autor caracteriza detalhadamente factores de combustão para as diferentes componentes de biomassa (folhas, ramos, etc.) tanto para folhosas como para resinosas, quando sob acção de fogos de diferente severidade. Outra possível evolução neste aspecto seria conjugar os factores de combustão com o clima, com recurso a um índice meteorológico, como faz Amiro *et al.* (2001) no seu estudo sobre as emissões dos fogos florestais canadianos. Qualquer um destes estudos poderia resultar numa melhoria significativa, uma vez que, nesta tese apenas se conseguiu utilizar factores de combustão específicos para cada componente da biomassa (e ainda assim, para a biomassa de ramos finos, a informação é manifestamente insuficiente), não havendo estudos suficientes que permitissem especificar por espécie.

No que respeita aos factores de emissão, tendo em conta os resultados obtidos na análise de sensibilidade, com estes a revelarem uma enorme importância na variância do resultado do modelo, em toda a série temporal e para todos os compostos químicos, seria muito útil se as incertezas que rodeiam esta variável fossem reduzidas e houvesse uma caracterização mais específica para a vegetação portuguesa.

Os resultados aqui obtidos confirmam o CO₂ como o gás que é emitido em maiores quantidades (Scholes, 1995, Langmann *et al.*, 2009). Contudo, importa reforçar a ideia de que são também emitidas não só quantidades significativas de outros gases que têm um

potencial de efeito de estufa superior, como também quantidades importantes de aerossóis. Tanto os gases com efeito de estufa como os aerossóis têm impactos significativos na atmosfera, uma vez que alteram o balanço energético da Terra, afectando o clima local e global. Ao nível local, o impacto mais importante dos aerossóis é na saúde pública, ao agravar doenças respiratórias.

Embora os principais gases com efeito de estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O) ocorram naturalmente na atmosfera, as actividades humanas têm vindo a aumentar as suas concentrações de forma muito significativa (Crutzen e Lelieveld, 2001, Pereira, 2009). No que respeita à comparação com as outras fontes de poluentes, embora o sector energético represente, claramente, a maior parte das emissões de gases com efeito de estufa, não deixa de ser interessante constatar que as emissões resultantes dos fogos de vegetação estão próximas daquelas que resultam de outros sectores de actividade, como seja a agricultura ou a indústria. Este resultado mostra a importância que deve ser dada às emissões resultantes dos fogos de vegetação, sobretudo tendo em conta que Portugal, ao abrigo do Protocolo de Quioto, se encontra comprometido a reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa, entre 2008 e 2012.

As emissões de CO_2 que resultam dos fogos de vegetação podem, pelo menos em parte, ser re-absorvidas pelas florestas através da fotossíntese. Contudo, com o aumento da frequência do fogo que se poderá verificar com as perspectivas de aumento da temperatura e concentrações de gases com efeito de estufa na atmosfera (Pereira e Santos, 2003, Flannigan *et al.*, 2000, Arora e Boer, 2005), tornam bastante improvável o crescimento das florestas até idades avançadas e, como tal, implausível a re-absorção daquilo que é emitido. Para além disso, uma maior frequência do fogo implicará, necessariamente, maiores quantidades de compostos químicos a serem libertados para a atmosfera (Wiedinmyer e Neff, 2007). Por outro lado, existem ainda os outros compostos químicos (CO , N_2O , CH_4 , entre outros) que, ao contrário do CO_2 , não são passíveis de serem re-absorvidos pela vegetação (Scholes, 1995). Assim, os compostos químicos libertados irão manter-se na atmosfera, contribuindo, ainda mais, para um aumento do efeito de estufa e para as alterações climáticas (Andreae, 1991).

Com a consciência de que há ainda um caminho a percorrer no sentido de melhorar as estimativas das emissões resultantes dos fogos de vegetação, entende-se que o rigor com que este trabalho foi abordado e a metodologia aqui desenvolvida significam uma evolução relativamente a estudos anteriores e poderão contribuir para o progresso do conhecimento sobre esta matéria, disponível em Portugal. Não foi encontrado, para nenhum outro país

européu, um estudo com igual volume de dados ou com o rigor metodológico que aqui se seguiu.

7. Referências bibliográficas

Amiro, B.D., Todd, J.B., Wotton, B.M., Logan, K.A., Flannigan, M.D., Stocks, B.J., Mason, J.A., Martell, D.L.e Hirsch, K.G. (2001) Direct carbon emissions from Canadian forest fires, 1959-1999. *Canadian Journal of Forest Research* **31** (3): 512-525.

Andreae, M.O. (1991) Biomass burning: its history, use, and distribution and its impacts on environmental quality and global climate. Em: Levine, J.S. (2001) Global biomass burning. Atmospheric, climatic and biospheric implications. MIT Press, Cambridge, Massachusetts: 1 – 21.

Andreae, M.O.e Merlet, P. (2001) Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* **15** (4): 955-966.

Arora, V.K.e Boer, G.J. (2005) Fire as an interactive component of dynamic vegetation models. *Journal of Geophysical research* **110**: 1 - 20.

Baeza, M.J., De Luis, M., Raventós, J.e Escarré, A. (2002) Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk. *Journal of Environmental Management* **65** (2): 199-208.

Barbosa, P.M., Stroppiana, D., Grégoire, J.M.e Pereira, J.M.C. (1999) An assessment of vegetation fire in Africa (1981 - 1991): burned areas, burned biomass, and atmospheric emissions. *Global Biogeochemical cycles* **13** (4): 933-950.

Botelho, H.S., Vega, J.A., Fernandes, P.e Rego, F.M.C. (1994) Prescribed fire behaviour and fuel consumption in northern Portugal and Galiza maritime pine stands. II International Conference on Forest Fire Research, Coimbra. I: 343-353.

Campbell, J., Donato, D., Azuma, D. e Law, B. (2007) Pyrogenic carbon emission from a large wildfire in Oregon, United States. *Journal of Geophysical Research* **112**: 1 – 11.

Chan, K., Saltelli, A. e Tarantola, S. (1997) Sensitivity analysis of model output: variance-based methods make the difference. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference.

Chen, X., Shuguang, L., Zhu, Z., Vogelmann, J., Li, Z. e Ohlen, D. (2009) Estimating aboveground biomass carbon and fire consumption in the U.S. Utah High Plateaus using data from the Forest Inventory and Analysis Program, Landsat and LANDFIRE. *Ecological Indicators* **495**.

Cinnirella, S., Pirrone, N., Allegrini, A.e Guglietta, D. (2007) Modeling mercury emissions from forest fires in the Mediterranean region. *Environmental Fluid Mechanics* **8** (2): 129-145.

- Conard, S.G., Sukhinin, A.I., Stocks, B.J., Cahoon, D.R., Davidenko, E.P.e Ivanona, G.A. (2002) Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climate Change* **55**: 197 – 211.
- Correia, A., Faias, S., Tomé, M., Evangelista, M., Freire, J.e Carvalho, P.O. (2008) Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de Pinheiro Manso no Sul de Portugal. *Silva Lusitana* **16** (2): 197-205.
- Crosetto, M., Tarantola, S. e Saltelli, A. (2000) Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modeling based on GIS. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **81**: 71 – 79.
- Crutzen, P.J., Heidt, L.E., Krasnec, J.P., Pollock, W.H.e Seiler, W. (1979) Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl e COS. *Nature* **282** 253-256.
- Crutzen, P.J. E Lelieveld, J. (2001) Human impacts on atmospheric chemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **29**: 17 – 45.
- Cruz, M.G.e Viegas, D.X. (2001) Caracterização do comportamento do fogo em complexos combustíveis comuns na região centro de Portugal. *Silva Lusitana* **9** (1): 13-34.
- De Luis, M., Baeza, M., Raventós, J.e González-Hidalgo, J. (2004) Fuel characteristics and fire behaviour in mature Mediterranean gorse shrublands. *International Journal of Wildland Fire* **13** (1): 79-87.
- Delmas, R., Lacaux, J.e Brocard, D. (1995) Determination of biomass burning emission factors: methods and results. *Environmental Monitoring and Assessment* **38** (2-3): 181-204.
- Direcção Geral dos Recursos Florestais (DGRF) (2007) Resultados do Inventário Florestal Nacional 2005-2006 (IFN0506): www.afn.min-agricultura.pt/.../ifn/ifn-apresentacao-de-resultados.
- Dimitrakopoulos, A.P. (2002) Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *International Journal of Wildland Fire* **11**: 127 - 130.
- European Environment Agency (EEA) (1999). EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook. 3rd ed. Technical report N°30, Other sources and sinks, Group 11.
- Fernandes, P.M., Ribeiro, L., Botelho, H.e Rodrigues, A. (1998) Short-term recovery of *Erica australis* shrubland in NE Portugal after prescribed burning. III International Conference on Forest Fire Research, 14th Conference on Fire and Forest Meteorology; Luso; II: 1853 - 1862.

Fernandes, P., Botelho, H.e Loureiro, C. (2000a) Fire hazard implications of alternative fuel management techniques - case studies from Northern Portugal. The Joint Fire Science Conference and Workshop - Crossing the Millenium: Integrating Spatial Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management. Idaho. International Association of Wildland Fire.

Fernandes, P., Ruivo, L., Gonçalves, P., Rego, F.e Silveira, S. (2000b) Dinâmica da combustibilidade nas comunidades vegetais da Reserva Natural da Serra da Malcata. Actas do Congresso Ibérico de Fogos Florestais. Castelo Branco.

Fernandes, P.M., Catchpole, W.R.e Rego, F.C. (2000c) Shrubland fire behaviour modelling with microplot data. *Canadian Journal of Forest Research* **30**: 889-899.

Fernandes, P.M., Loureiro, C., Botelho, H., Ferreira, A.e Fernandes, M. (2002) Avaliação indirecta da carga de combustível em pinhal bravo. *Silva Lusitana* **10** (1): 73-90.

Fernandes, P., Loureiro, C.e Botelho, H. (2004) Outcomes of a high-intensity experimental fire in a maritime pine stand. International Workshop on Forest Fires in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe: an integral planning and management challenge. Atenas, Grécia.

Fernandes, P., Luz, A., Loureiro, C., Ferreira-Godinho, P.e Botelho, H. (2006) Fuel modelling and fire hazard assessment based on data from the Portuguese National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management* **234** (S1): S229.

Fernandes, P.M.e Rigolot, E. (2007) The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* **241** (1-3): 1-13.

Flannigan, M.D., Stocks, B.J. e Wotton, B.M. (2000) Climate change and forest fires. *The science of the total environment* **262**: 221 – 229.

García, L., Maltez-Mouro, S., Pérez-Ramos, I., Freitas, H.e Marañón, T. (2006) Counteracting gradients of light and soil nutrients in the understory of Mediterranean oak forests. *Web Ecology* **6** 67-74.

Haywood, J. e Boucher, O. (2000) Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review. *Reviews of Geophysics* **38**(4): 513 – 543.

Helton, J.C.e Davis, F.J. (2003) Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering and System Safety* **81**:23 - 69.

Hodzic, A., Madronich, S., Bohn, B., Massie, S., Menut, L. e Wiedinmyer, C. (2007) Wildfire particulate matter in Europe during summer 2003: meso-scale modeling of smoke emissions, transport and radiative effects. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* **7**: 4705 – 4760.

Innes, J.L. (2000) Biomass burning and climate: an introduction. Innes, J.L., Beniston, M.e Verstraete, M.M. Book. Biomass burning and climate: an introduction. Kluwer Academic Publishers. Holanda.

Instituto Geográfico Português (IGP)

http://www.igeo.pt/produtos/CEGIG/cos_cartograma.htm

Joffre, R.e Rambal, S. (2002) Mediterranean Ecosystems. *Encyclopedia of life sciences*: 1 - 7.

Johnson, E.A.e Gutsell, S.L. (1994) Fire frequency models, methods and interpretations. *Advances in ecological research* **25**: 239 – 287.

Kaufman, Y.J., Tanré, D. e Boucher, O. (2002) A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature* **419**: 215 – 223.

Kavvadias, V., Alifragis, D., Tsiontsis, A., Brofas, G.e Stamatelos, G. (2001) Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecology and Management* **144** (1-3): 113-127.

Kioutsioukis, I., Tarantola, S., Saltelli, A. e Gatelli, D. (2004) Uncertainty and global sensitivity analysis of road transport emission estimates. *Atmospheric Environment* **38**: 6609 – 6620.

Korontzi, S., Roy, D.P., Justice, C.O. e Ward, D.E. (2004) Modeling and sensitivity analysis of fire emissions in southern Africa during SAFARI 2000. *Remote Sensing of Environment* **92**: 255 – 275.

Kucherenko, S. (2008) High dimensional Sobol' Sequences and their applications. BRODA Ltd. 2008, Technical report.

Langmann, B., Duncan, B., Textor, C., Trentmann, J.e van der Werf, G. (2009) Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate. *Atmospheric Environment* **43** (1): 107-116.

Leenhouts, B. (1998) Assessment of biomass burning in the conterminous United States. *Conservation Ecology [online]* **2** (1): <http://www.ecologyandsociety.org/vol2/iss1/art1/>.

Lehsten, V., Tansey, Balzter, H., Thonicke, K., Spessa, A., Weber, U., Smith, B., e Arneeth, A. (2009) Estimating carbon emissions from African wildfires. *Biogeosciences* **6**: 349 – 360.

Liu, Y. (2004) Variability of wildland fire emissions across the contiguous United States. *Atmospheric Environment* **38** (21): 3489-3499.

Lohmann, U. e Feichter, J. (2005) Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics* **5**: 715 – 737.

Madeira, M., Fabião, A., Pereira, J.S., Araújo, M. e Ribeiro, C. (2002) Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management* **171** (1): 75-85.

Matthews, J.D. (1997) Silvicultural systems. Oxford University Press. New York.

McCaw, L., Neal, J., Smith, R. (2002). Stand characteristics and fuel accumulation in a sequence of even-aged karri (*Eucalyptus diversicolor*) stands in south-west Western Australia. *Forest Ecology and Management* **158**: 263–271.

Menon, S. (2004) Current uncertainties in assessing aerosol effects on climate. *Annual Reviews of Environment and Resources* **29**: 1 – 30.

Miranda, P.M.A., Valente, M.A., Tomé, A.R., Trigo, R., Coelho, M.F., Aguiar, A. e Azevedo, E.B. (2006) O clima de Portugal nos séculos XX e XXI. Em: Santos, F.D. e Miranda, P.M.A. (2006) Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II. Gradiva, Lisboa.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R. e Muñoz, M. (2005) Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. *INIA* 220: 25 – 36.

Montgomery, D.C. e Runger, G.C. (1999) Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons, Ltd.

Narayan, C., Fernandes, P.M., van Brusselen, J. e Schuck, A. (2007) Potential for CO₂ emissions mitigation in Europe through prescribed burning in the context of the Kyoto Protocol. *Forest Ecology and Management* **251** (3): 164-173.

Numerical terradynamic simulation group (NTSG):

<http://images.ntsg.umd.edu/searchresults.php?where=Browse&crid=11&showThumbs=on&limit=10>

Oliveira, S. (2008) Análise da frequência do fogo em Portugal Continental (1975-2005), com a distribuição de Weibull. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa

Olson, J.S. (1963) Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* **44** (2): 322-331.

Ormeño, E., Céspedes, B., Sánchez, I., Velasco-García, A., Moreno, J., Fernandez, C.e Baldy, V. (2009) The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. *Forest Ecology and Management* **257** (2): 471-482.

Palacios-Orueta, A., Chuvieco, E.e Carmona, C. (2002) Trace Gas Emission Estimation in Biomass Burning. State of the Art. European Comission, Ispra, Itália.

Palacios-Orueta, A., Chuvieco, E., Parra, A.e Carmona-Moreno, C. (2005) Biomass burning emissions: a review of models using remote-sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment* **104** (1-3): 189-209.

Pereira, J.M.C.e Santos, M.T.N. (2003) Fire risk and burned area mapping in Portugal. Direcção Geral das Florestas. Lisboa.

Pereira, J.M.C., Carreiras, J.M.B., Silva, J.M.N. e Vasconcelos, M.J. (2006) Alguns conceitos básicos sobre os fogos rurais em Portugal. Em: Santos Pereira, J., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, T.P. e Silva, J.M.N. (2006) Incêndios florestais em Portugal. Caracterização, impactes e prevenção. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa: 133 – 161.

Pereira, T.C., Seabra, T., Maciel, H. e Torres, P. (2009) Portuguese national inventory report on greenhouse gases, 1990 – 2007. Submitted under the united nations framework convention on climate change and the Kyoto protocol. Agência Portuguesa do Ambiente.

Pio, C.A., Silva, T.P., Pereira, J.M.C. (2006) Emissões e impacte na atmosfera. Em: Santos Pereira, J., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, T.P. e Silva, J.M.N. (2006) Incêndios florestais em Portugal. Caracterização, impactes e prevenção. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa: 165 – 198.

Rambal, S. (2001) Hierarchy and productivity of mediterranean-type ecosystems. Em: Roy, J., Saugier, B.e Mooney, H.A. (2001). Hierarchy and productivity of mediterranean-type ecosystems. Academic Press: 315 – 344.

Reid, J., Koppmann, R., Eck, T.e Eleuterio, D. (2005) A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* **5** (3): 799-825.

Saglam, B., Kuçuk, O., Bilgili, E., Durmaz, B.e Baysal, I. (2008) Estimating fuel biomass of some shrub species (Maquis) in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* **32**: 349-356.

Saltelli, A. (2002) Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communication* **145**: 580–297.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F.e Ratto, M. (2004) Sensitivity analysis in practice. A guide to assessing scientific models. John Wiley & Sons, Ltd.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. e Tarantola, S. (2008) Global sensitivity analysis. The Primer. John Wiley & Sons, Ltd.

Salvador, R., Piñol, J., Tarantola, S.e Pla, E. (2001) Global sensitivity analysis and scale effects of a fire propagation model used over Mediterranean shrublands. *Ecological Modelling* **136**: 175 - 189.

Scholes, R.J. (1995) Greenhouse gas emissions from vegetation fires in Southern Africa. *Environmental Monitoring and Assessment* **38** (2-3): 169 - 179.

Seiler, W.e Crutzen, P.J. (1980) Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climate Change* **2** (3): 207-247.

Silva, T.P. (2004) Estimativa das emissões atmosféricas originadas por incêndios em Portugal Continental ao longo do período compreendido entre 1990 e 1999. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa

Silva, T.P., Pereira, J.M.C., Paúl, J.C.P., Santos, M.T.N.e Vasconcelos, M.J.P. (2006) Estimativa de emissões atmosféricas originadas por fogos rurais em Portugal. *Silva Lusitana* **14** (2): 239 - 263.

Simmonds, P.G., Manning, A.J., Derwent, R.G., Ciais, P., Ramonet, M., Kazan, V. e Ryall, D. (2005) A burning question. Can recent growth rate anomalies in the greenhouse gases be attributed to large-scale biomass burning events? *Atmospheric Environment* **39**: 2513 – 2517.

Simões, M.P., Madeira, M.e Gazarini, L. (2001) Efeitos potenciais de arbustos do género Cistus L. na recuperação de solos. *Revista das Ciências Agrárias* **14** (3,4): 347 -360.

Simões, S.M. (2006) Expansão ao Alentejo e Algarve de uma curva de acumulação pós-fogo para a biomassa arbustiva. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia.

Sobol, I.M., e Kucherenko, S. (2005) On global sensitivity analysis of quasi-Monte Carlo algorithms. *Monte Carlo Methods and Simulation* **11** (1): 1–9.

Stamou, N., Kalabokidis, K.D., Konstantinidis, P., Fotiou, S., Christodoulou, A., Blioumis, V., Prastacos, P., Diamandakis, M.e Kochilakis, G. (1998) Improving the efficiency of the wildland fire prevention and supression system in Greece. III International Conference on Forest Fire Research, 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Luso. I: 203 - 221.

Stephens, S.e Finney, M. (2002) Prescribed fire mortality of Sierra Nevada mixed conifer tree species: effects of crown damage and forest floor combustion. *Forest Ecology and Management* **162** (2): 261 - 271.

Strauss, D., Bednar, L.e Mees, R. (1989) Do one percent of forest fires cause ninety-nine percent of the damage? *Forest Science* **35** (2): 319 - 328.

Tomé, M., Barreiro, S., Cortiçada, A., Paulo, J., Meyer, A., Ramos, T.e Malico, P. (2007) Inventário Florestal 2005-2006. Áreas, volumes e biomassas dos povoamentos florestais. Resultados nacionais e por NUT's II e III. Publicações GIMREF PT 8

van der Werf, G., Randerson, J., Giglio, L., Collatz, G., Kasibhatla, P.e Arellano Jr., A. (2006) Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics* **6**: 3423 - 3441.

van Wesemael, B.e Veer, M.A.C. (1992) Soil organic matter accumulation, litter decomposition and humus forms under mediterranean-type forests in southern Tuscany, Italy. *Journal of Soil Science* **43**: 133-144.

Vega, J., Fernandes, P., Cuiñas, P., Fontúrbel, M., Pérez, J.e Loureiro, C. (2006) Fire spread analysis of early summer fiel experiments in shrubland fuel types of northwestern Iberia. *Forest Ecology and Management* **234**: S102.

Vélez, R. (2000) La defensa contra los incendios forestales. Fundamentos y experiencias. McGrawhill.: 7.1-7.16.

Viegas, D.X., Ribeiro, P.R.e Cruz, M.G. (1998) Characterisation of the combustibility of forest fuels. III International Conference on Forest Fire Research; 14th Conference on Fire and Forest Meteorology; Luso; Vol. 1: 467- 482.

Wiedinmyer, C. e Neff, J.C. (2007) Estimates of CO₂ from fires in the United States: implications for carbon management. *Carbon Balance and Management* **2**(10): 1 – 12.

ANEXOS

Anexo I

Quadro 1 – Descrição de cada uma das classes consideradas na legenda dos mapas.

Classes	Descrição
Áreas urbanas	Área ocupada pelas localidades, estruturas construídas como estradas, caminhos-de-ferro ou aeroportos, bem como, espaços verdes urbanos, pedreiras, lixeiras, etc.
Culturas anuais	Área ocupada pelas culturas agrícolas anuais.
Vinha	Área ocupada pelas vinhas.
Pomar	Área ocupada pelos pomares.
Olival	Área ocupada pelos olivais.
Áreas agrícolas heterogéneas	Área que conjugue vários sistemas culturais, como por exemplo, pomar com vinha.
Territórios agroflorestais	Área que conjugue povoamentos florestais com culturas agrícolas.
Sobreiro	Área que seja ocupada por sobreiro (<i>Quercus suber</i>).
Azinheira	Área que seja ocupada por azinheira (<i>Quercus ilex</i>).
Eucalipto	Área que seja ocupada por eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>).
Outras folhosas	Área que seja ocupada por espécies de folhosas classificadas como outras folhosas no IFN (<i>Quercus faginea</i> , <i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Castanea sativa</i> , entre outras).
Pinheiro bravo	Área que seja ocupada por pinheiro bravo (<i>Pinus pinaster</i>).
Pinheiro manso	Área que seja ocupada por pinheiro manso (<i>Pinus pinea</i>).
Outras resinosas	Área que seja ocupada por espécies de resinosas classificadas como outras resinosas no IFN (<i>Pinus halepensis</i> , <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , entre outras).
Floresta mista (Pb + Ec)	Área que seja ocupada por povoamentos mistos de pinheiro bravo e eucalipto.
Floresta mista (Ec + Sb)	Área que seja ocupada por povoamentos mistos de eucalipto e sobreiro.
Vegetação arbustiva e herbácea	Área ocupada pelos matagais, espaços florestais degradados, pomares abandonados, etc.
Áreas com pouca vegetação	Área ocupada por dunas, rochas e de vegetação esparsa.
Água e zonas húmidas	Área ocupada pelos rios, sapais, salinas, zonas pantanosas, estuários, etc.
Ardido 1990 ... Ardido 2007	Área que arde em cada ano e que fica disponível para arder em anos posteriores.

Anexo II – Ajustamento estatístico das variáveis.

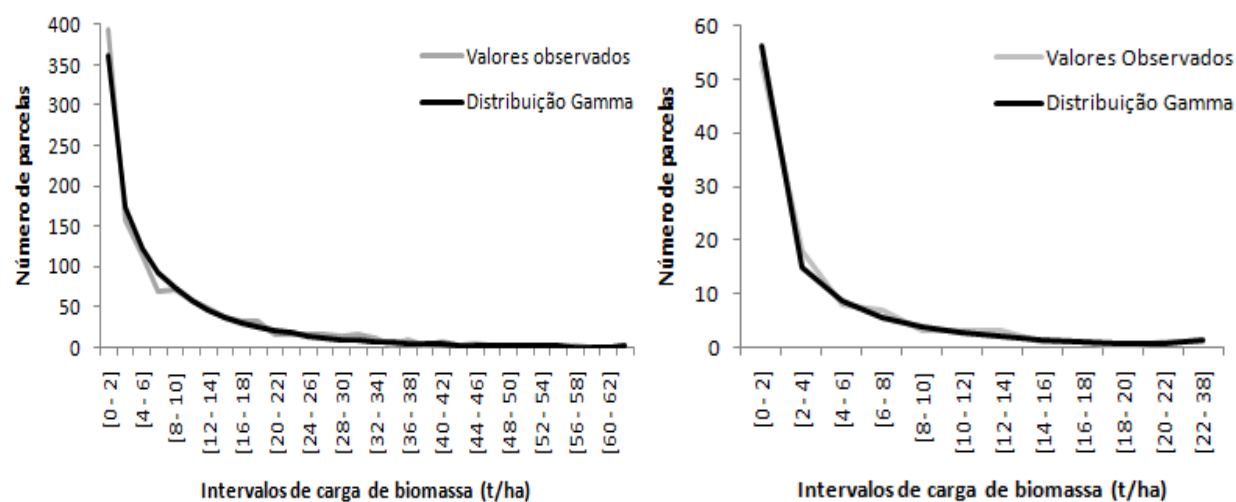


Figura 1 – Biomassa arbustiva de Pinheiro bravo (esquerda) e de Pinheiro manso (direita).

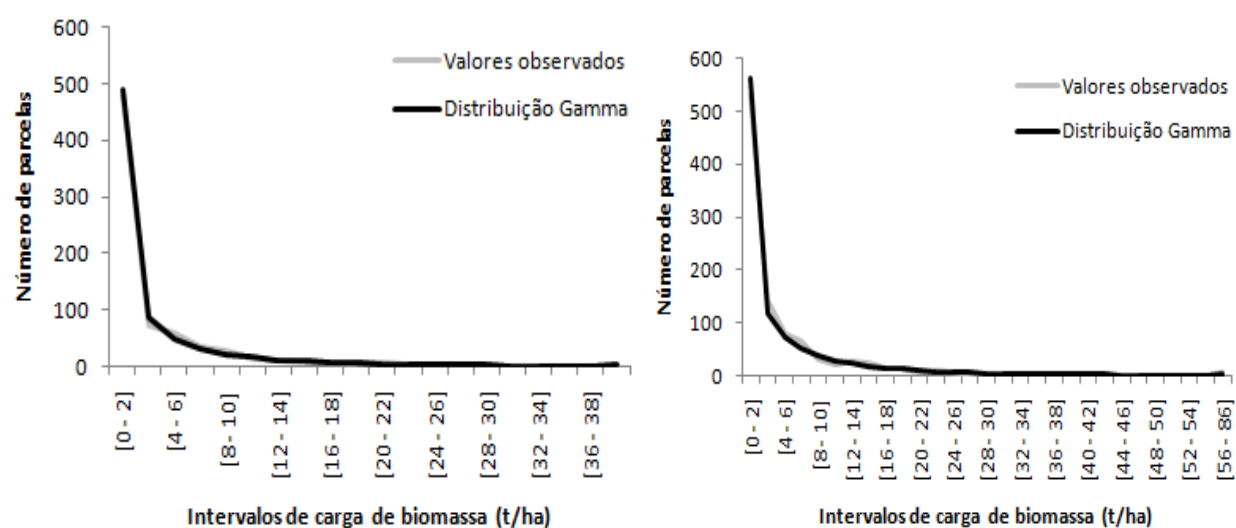
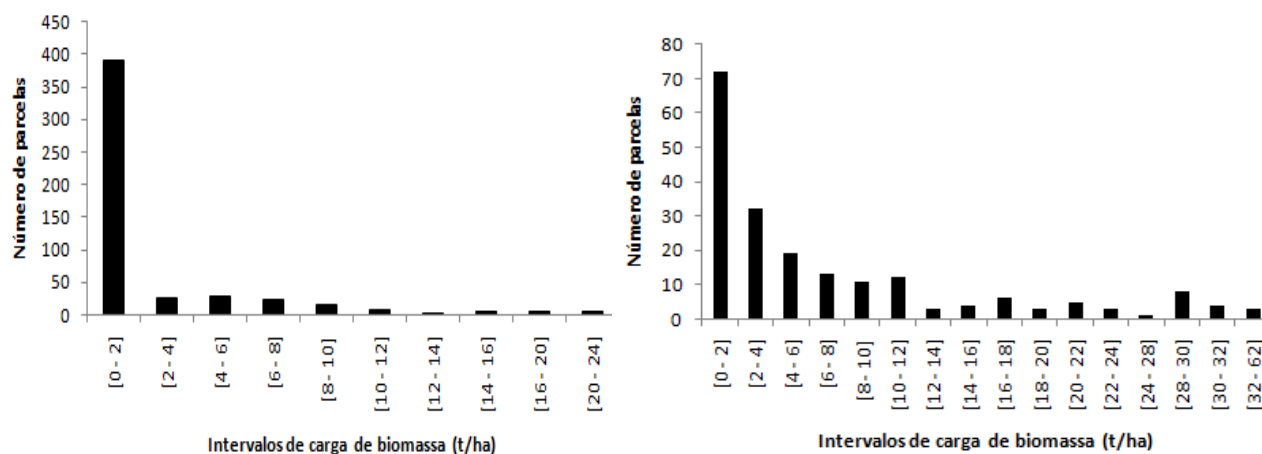
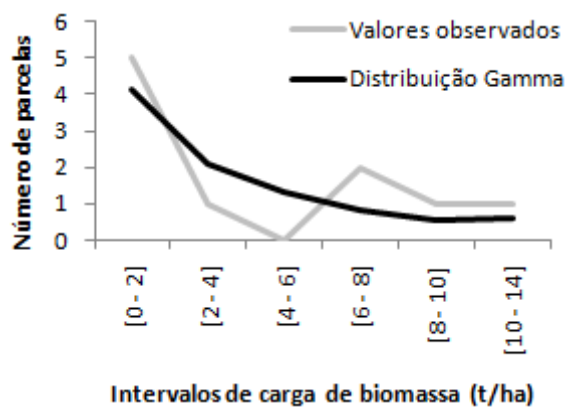
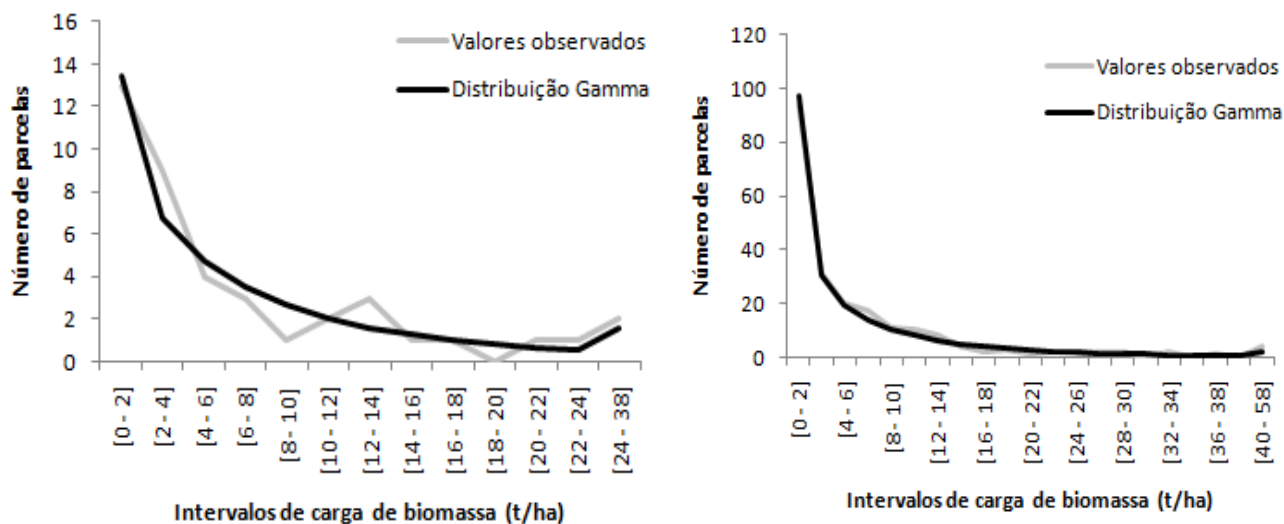


Figura 2 – Biomassa arbustiva de Sobreiro (esquerda) e de Eucalipto (direita).



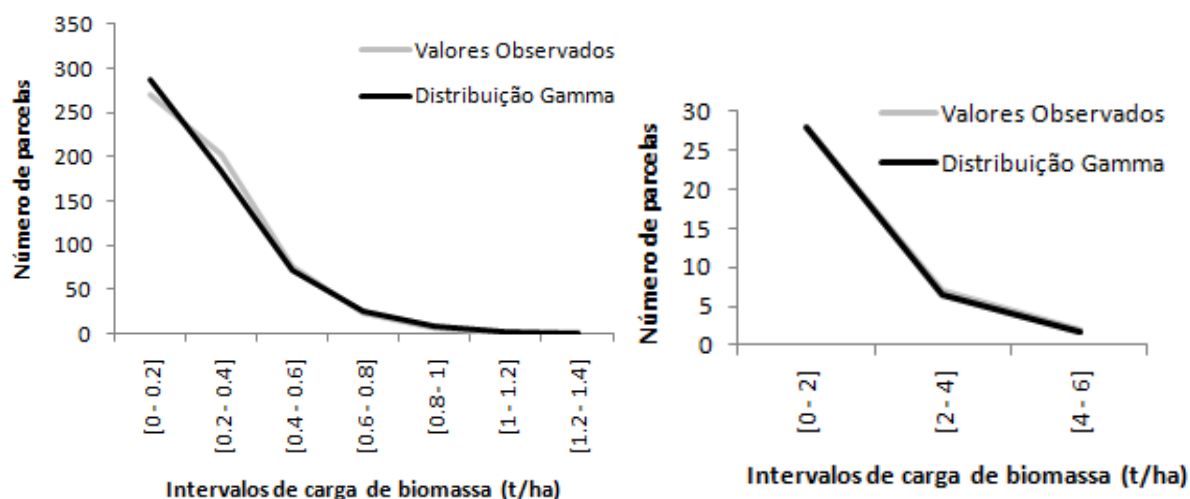


Figura 6 – Biomassa foliar de Azinheira (esquerda) e de Outras folhosas (direita).

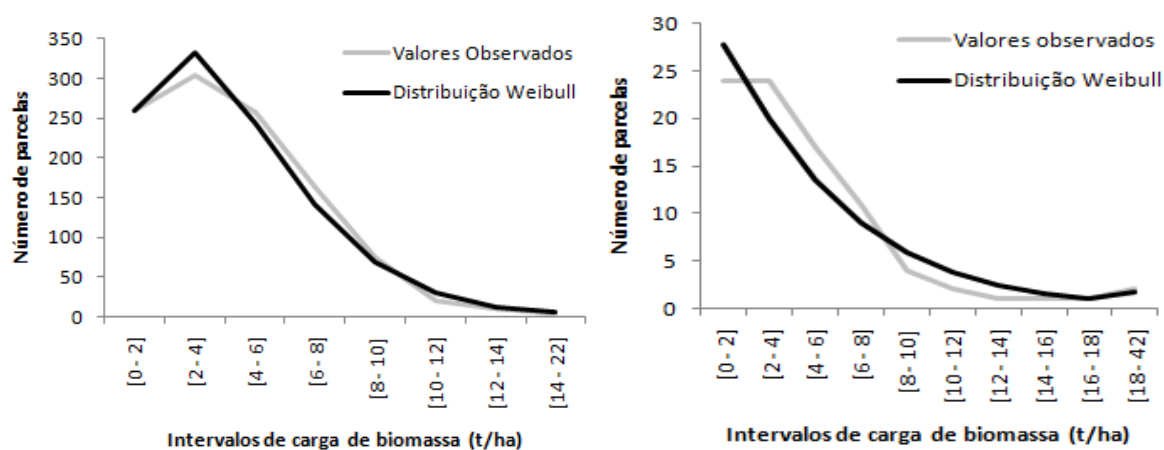


Figura 7 – Biomassa foliar de Pinheiro bravo (esquerda) e de Pinheiro manso (direita).

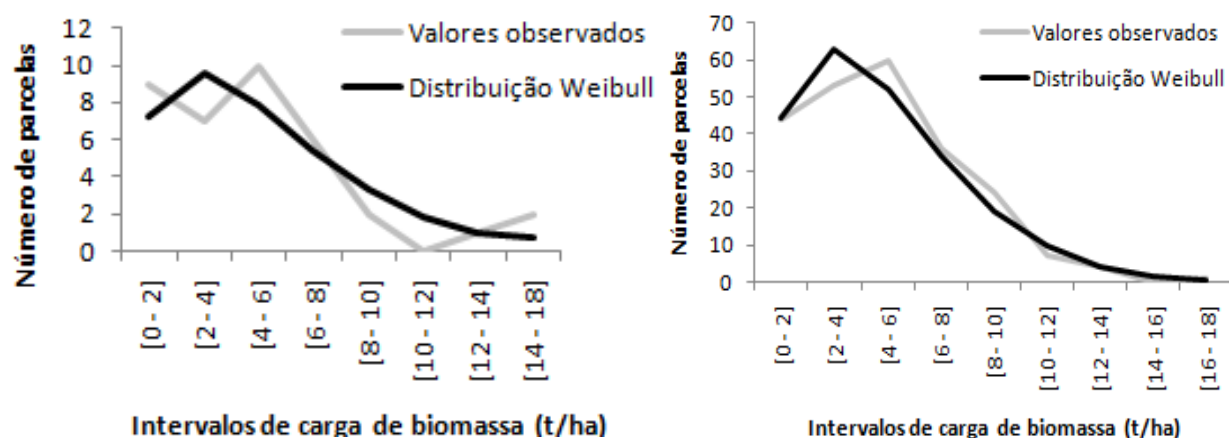


Figura 8 – Biomassa foliar de Outras resinosas (esquerda) e de Floresta Mista de Pinheiro bravo e de Eucalipto (direita).

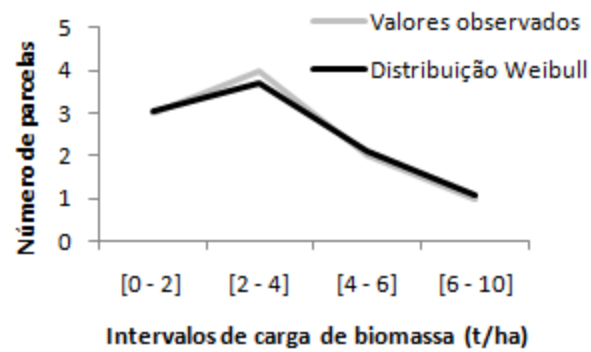


Figura 9 – Biomassa foliar de Floresta Mista de Eucalipto e de Sobreiro.

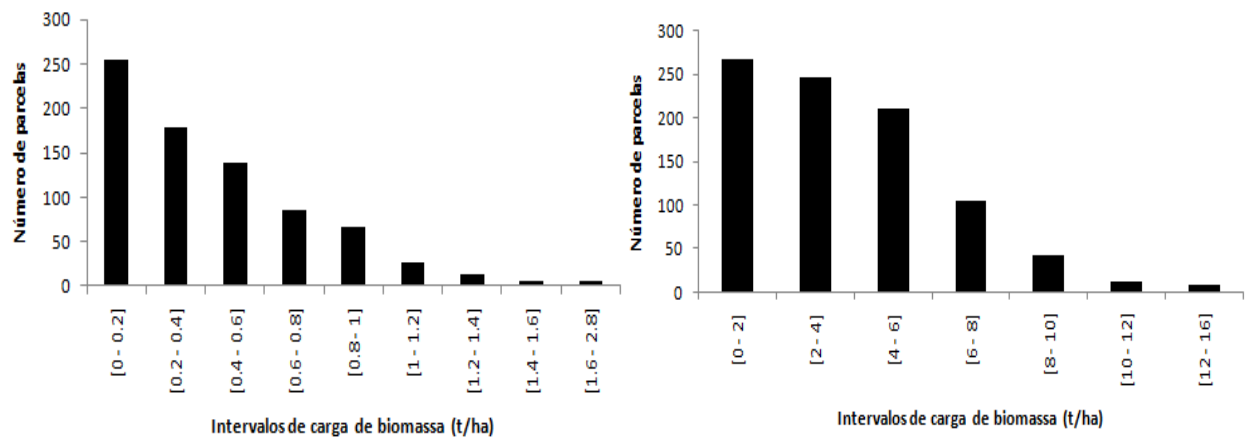


Figura 10 – Biomassa foliar de Sobreiro (esquerda) e de Eucalipto (direita).

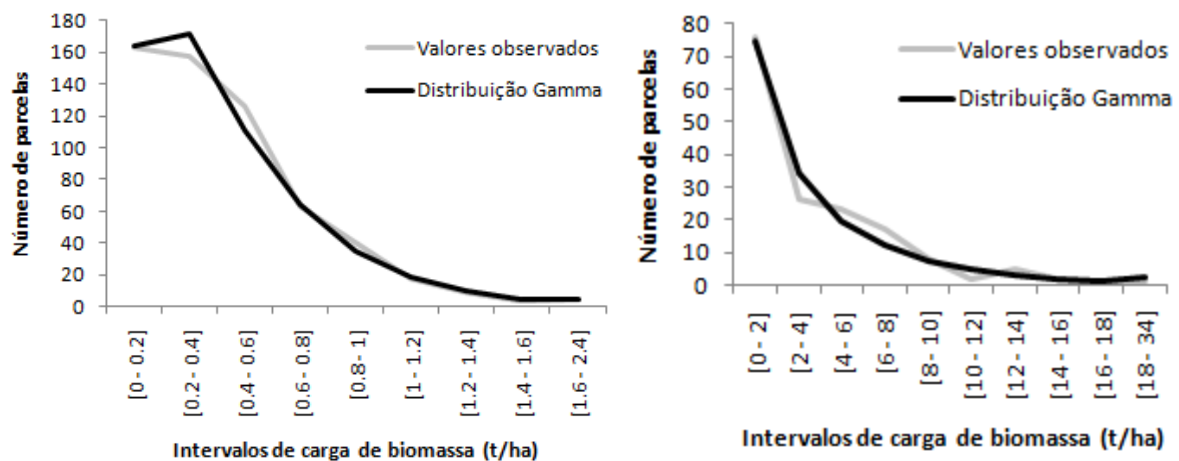


Figura 11 – Biomassa de ramos finos de Azinheira (esquerda) e de Outras folhosas (direita).

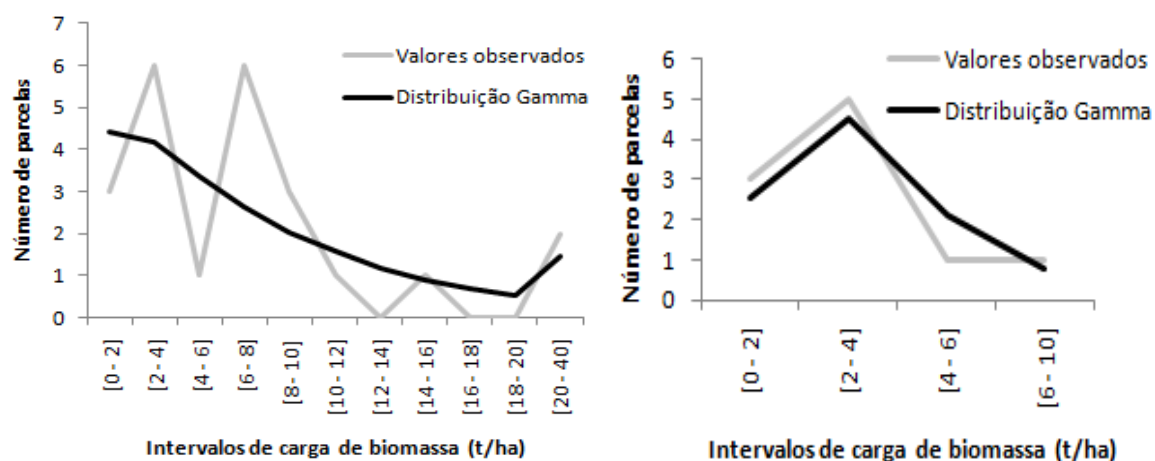


Figura 12 – Biomassa de ramos finos de Outras resinosas (esquerda) e de Floresta Mista de Eucalipto e de Sobreiro (direita).

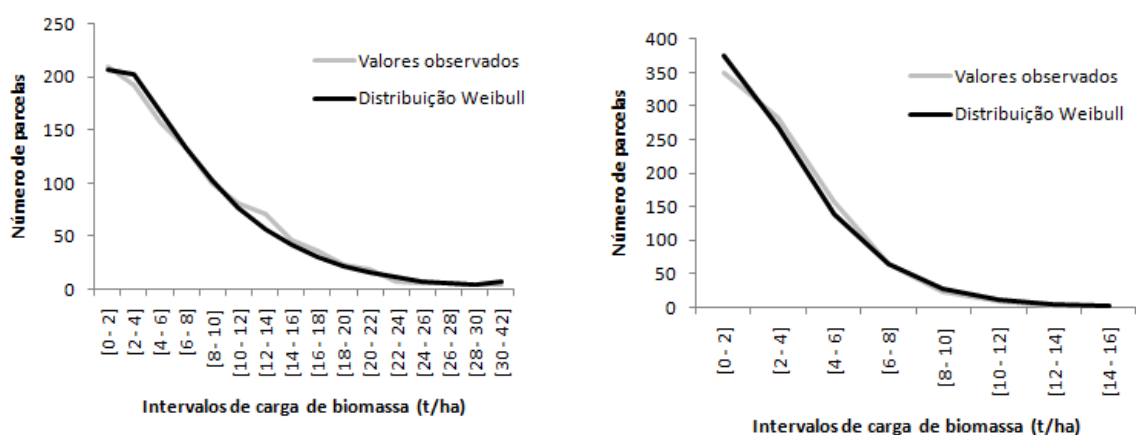


Figura 13 – Biomassa de ramos finos de Pinheiro bravo (esquerda) e de Eucalipto (direita).

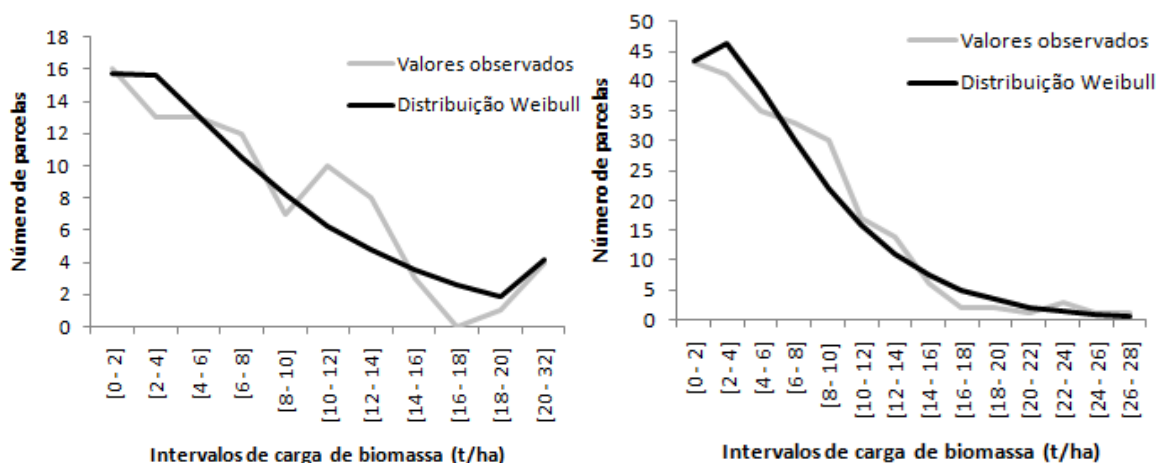


Figura 14 – Biomassa de ramos finos de Pinheiro manso (esquerda) e de Floresta Mista de Pinheiro bravo e de Eucalipto (direita)

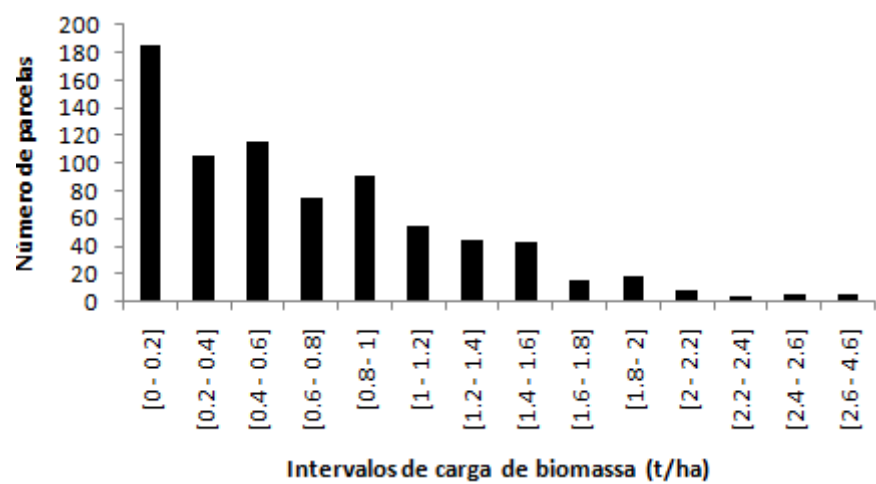


Figura 15 – Biomassa de ramos finos de Sobreiro.

Anexo III – Análise de incerteza e de sensibilidade para os restantes gases com efeito de estufa

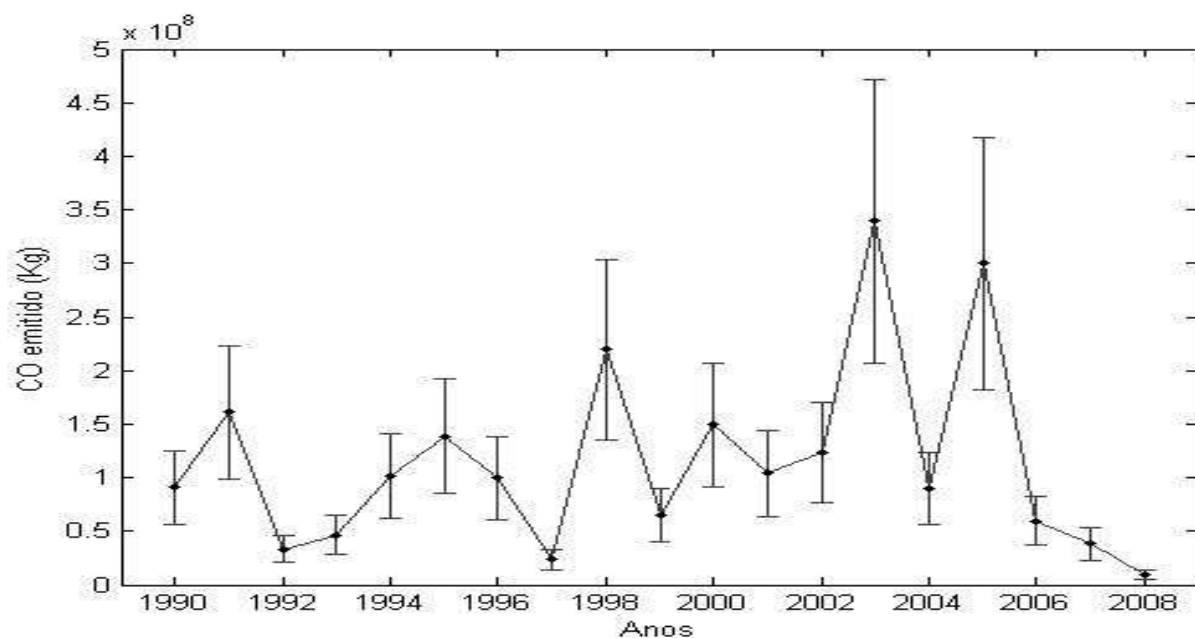


Figura 16 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de CO resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

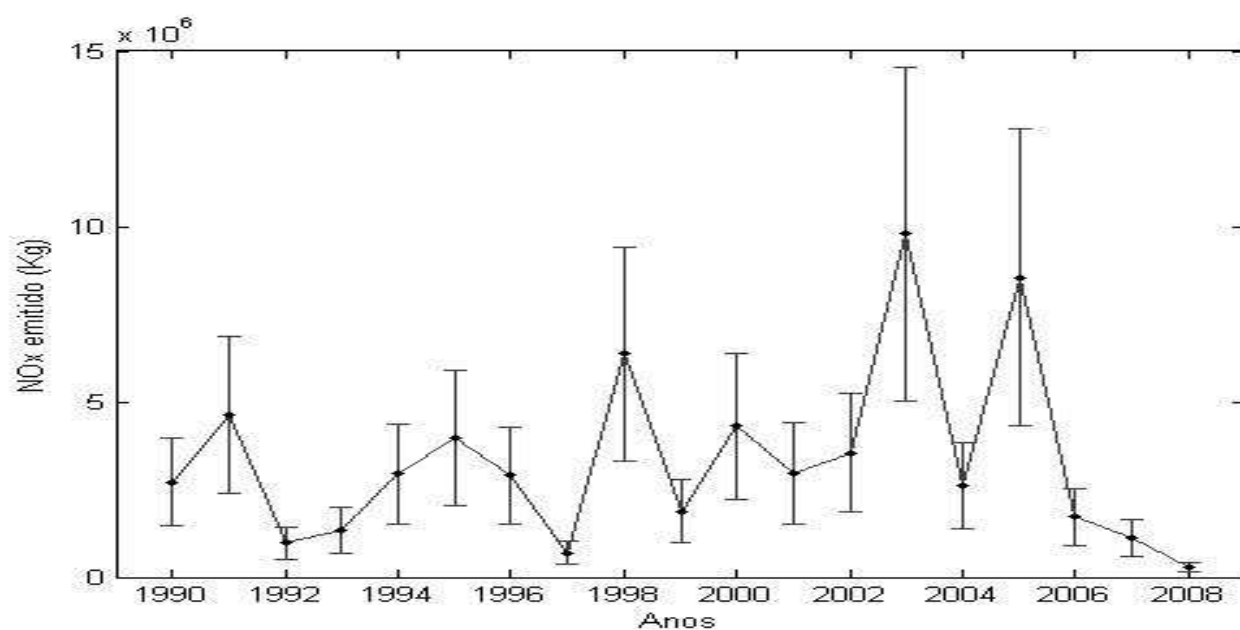


Figura 17 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de NO_x resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

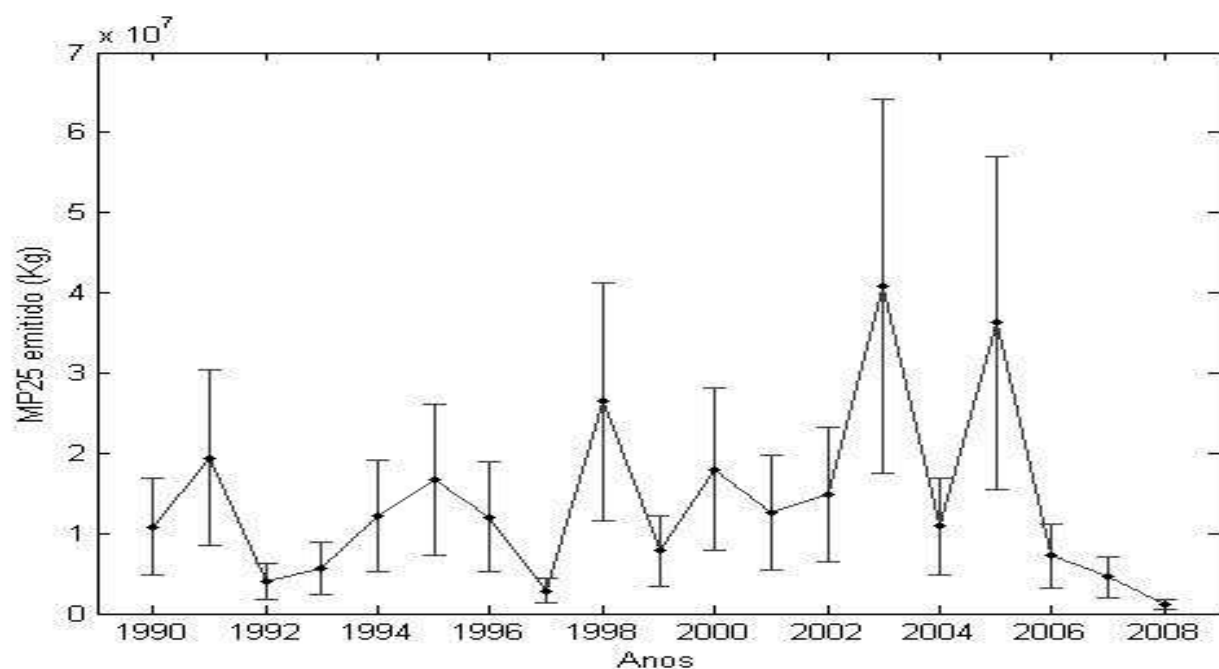


Figura 18 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de MP_{2,5µm} resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

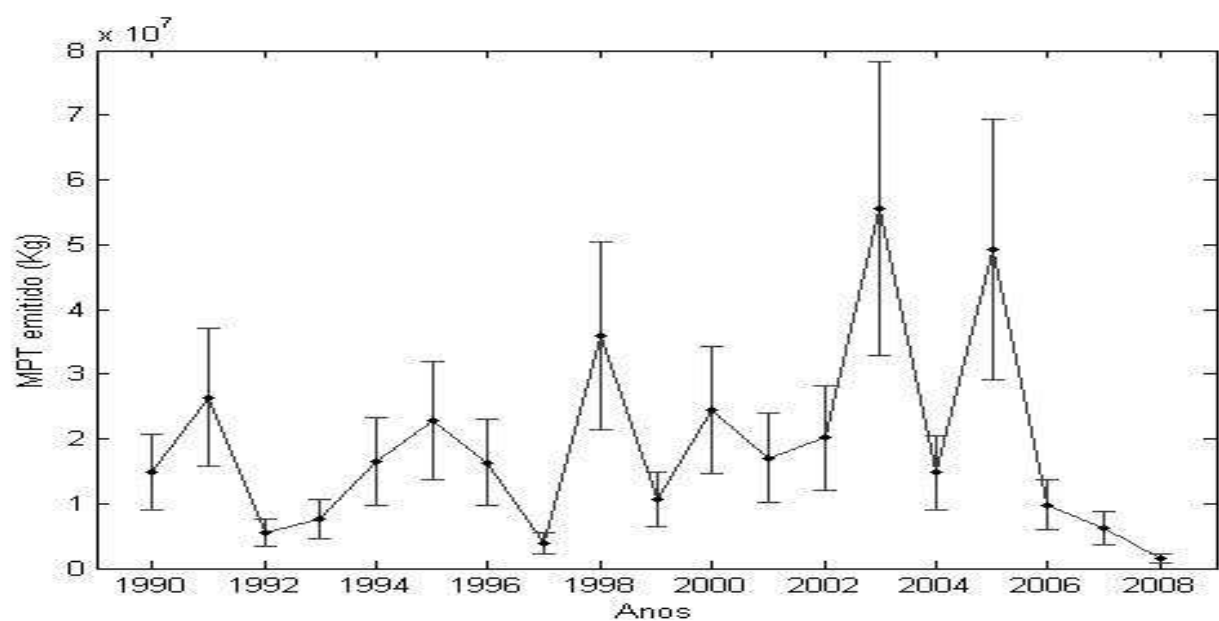


Figura 19 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de MPT resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

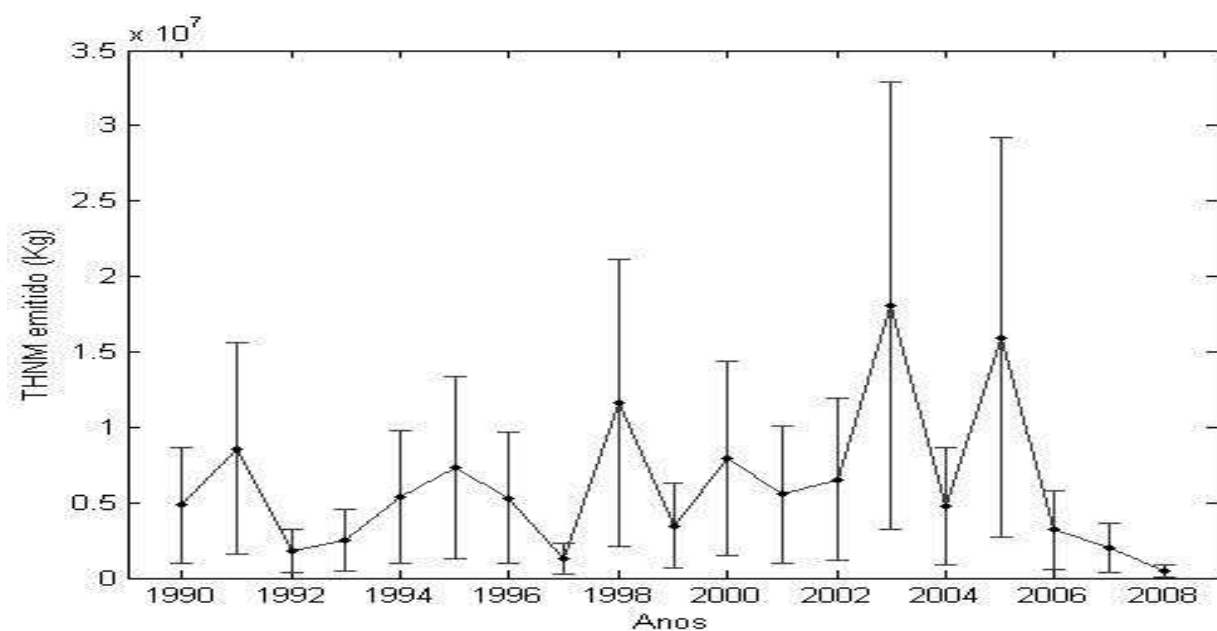


Figura 20 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de THNM resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

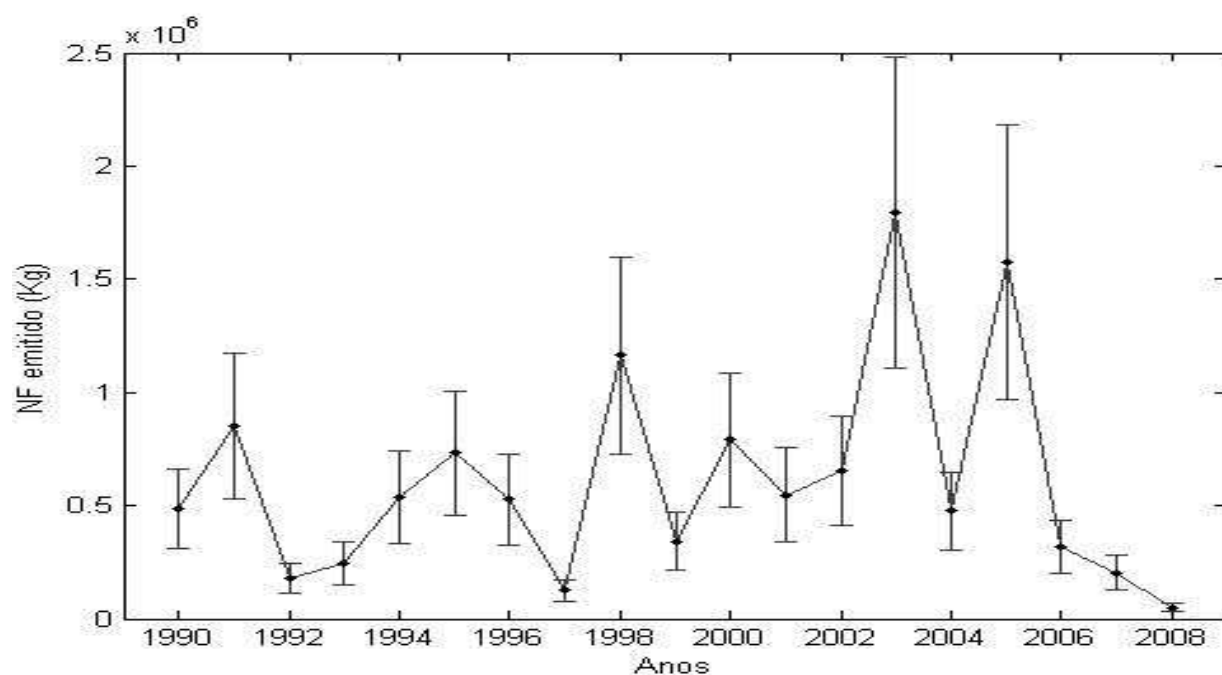


Figura 21 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de NF resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

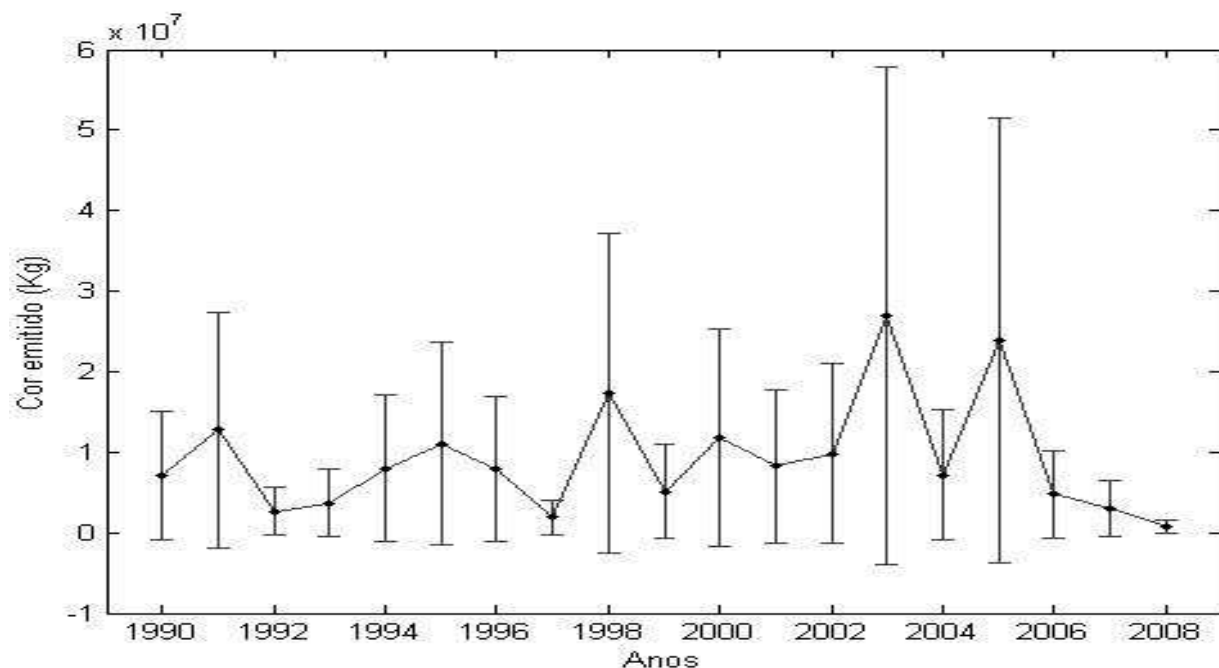


Figura 22 – Análise de incerteza (média e desvio padrão) da emissão de C_{or} resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

Note-se que neste caso a variação dos valores das emissões passa a barreira do zero, uma vez que, na bibliografia, para este composto químico, o desvio padrão é maior do que a média. No entanto, como não se teve acesso aos dados originais, não se pôde determinar qual seria a distribuição mais correcta para definir esta variável, optando-se por seguir a mesma metodologia para todos os compostos químicos.

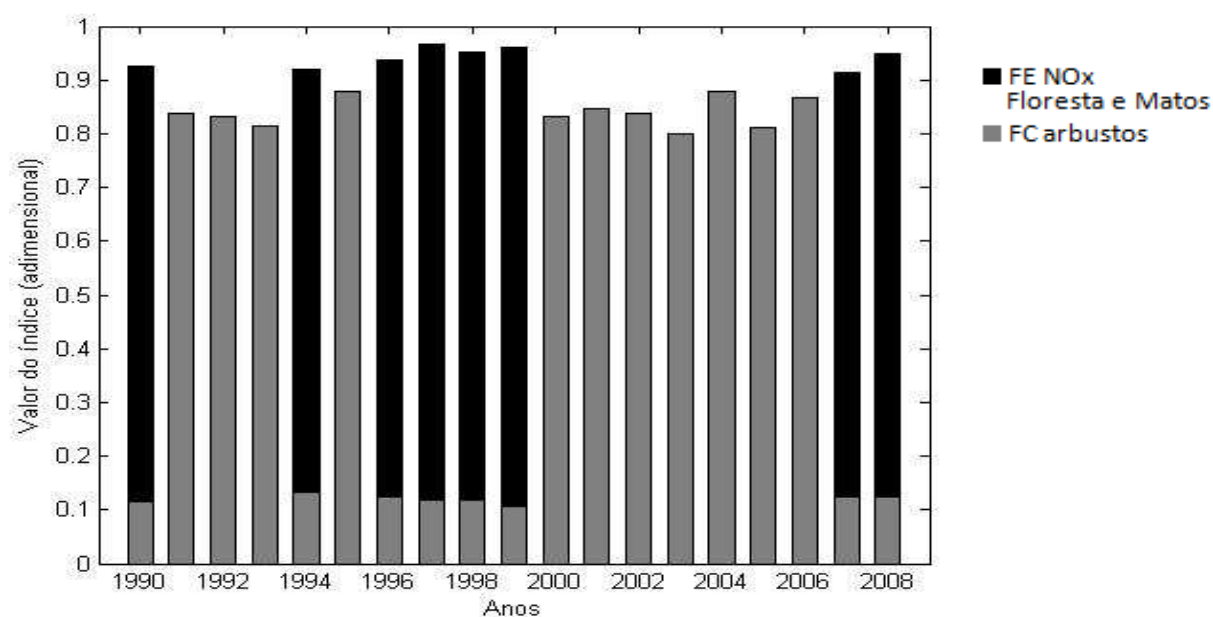


Figura 23 – Análise de sensibilidade das emissões de NO_x resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008. .

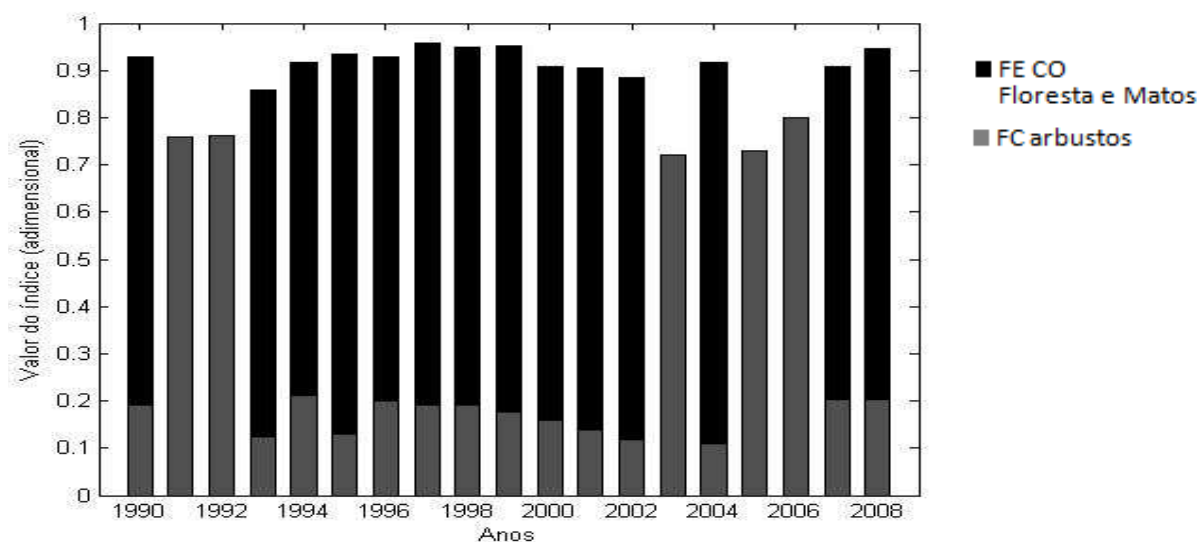


Figura 24 – Análise de sensibilidade das emissões de CO resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

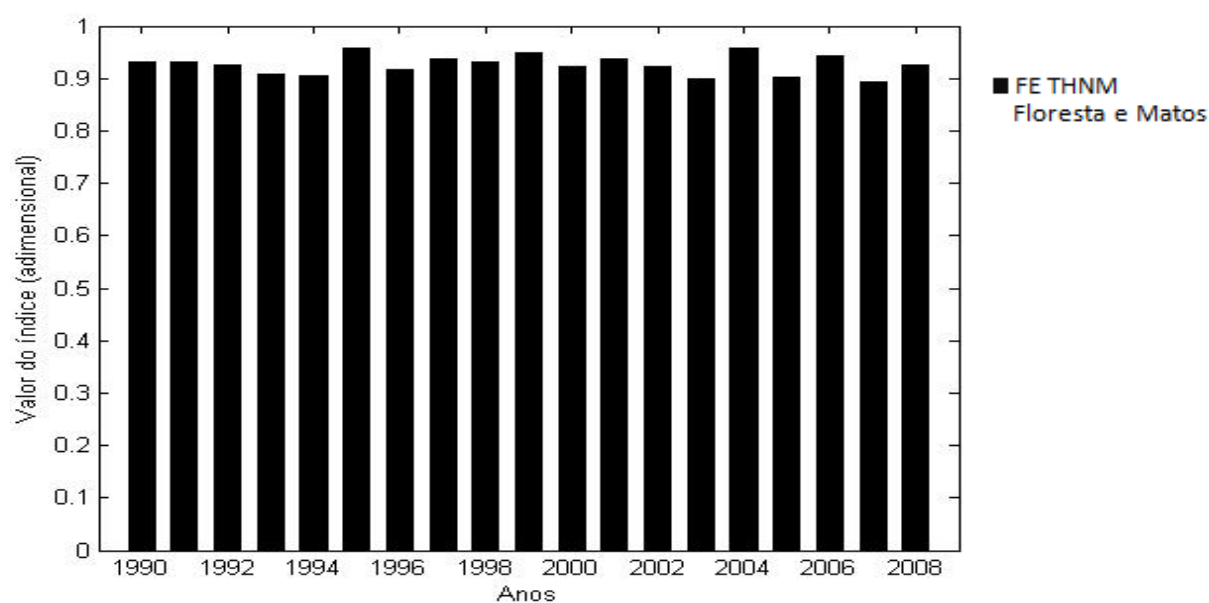


Figura 25 – Análise de sensibilidade das emissões de THNM resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

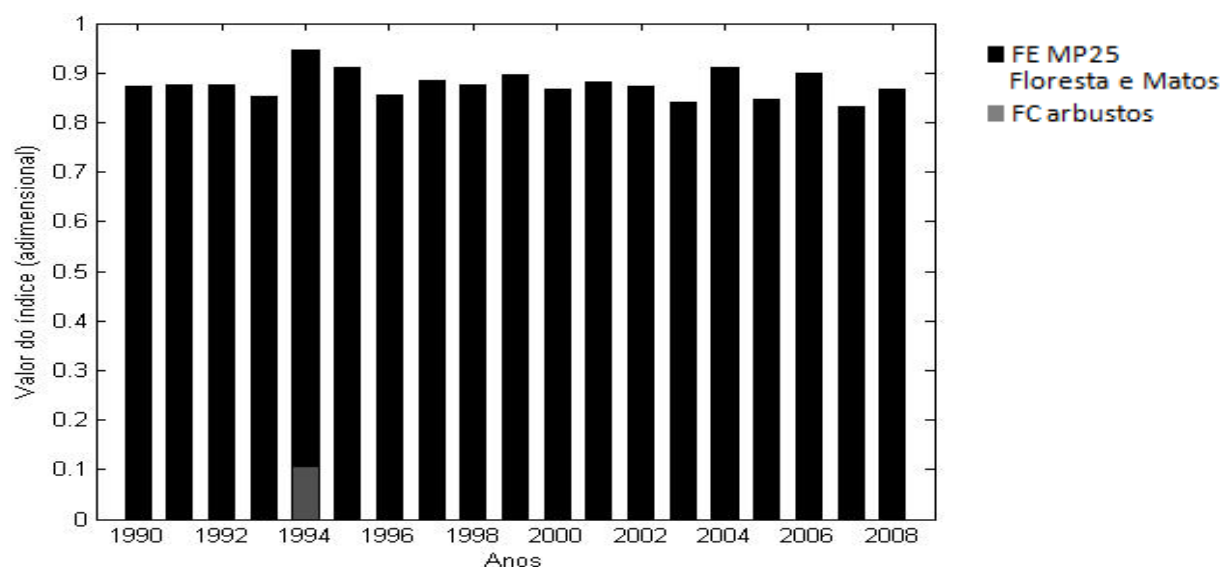


Figura 26 – Análise de sensibilidade das emissões de $MP_{2.5\mu m}$ resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

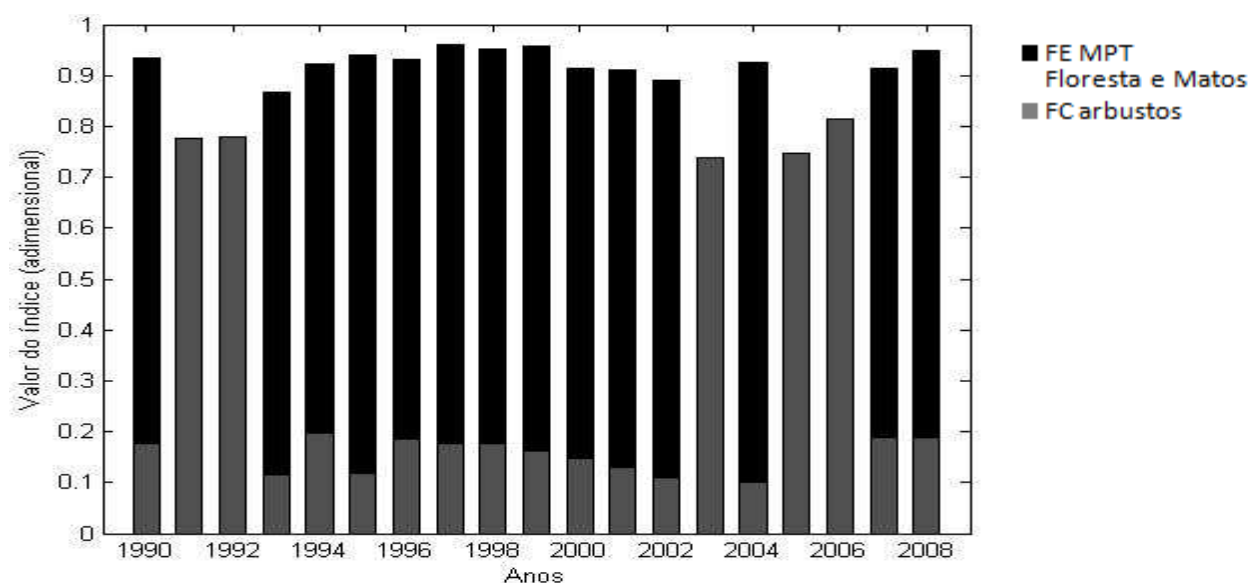


Figura 27 – Análise de sensibilidade das emissões de MPT resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

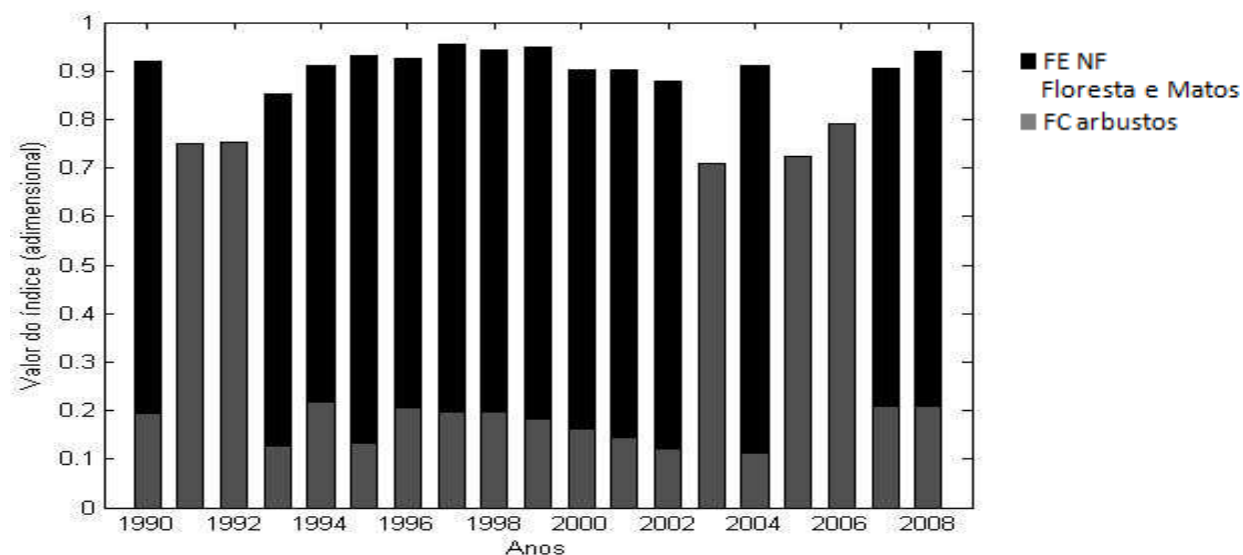


Figura 28 – Análise de sensibilidade das emissões de NF resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.

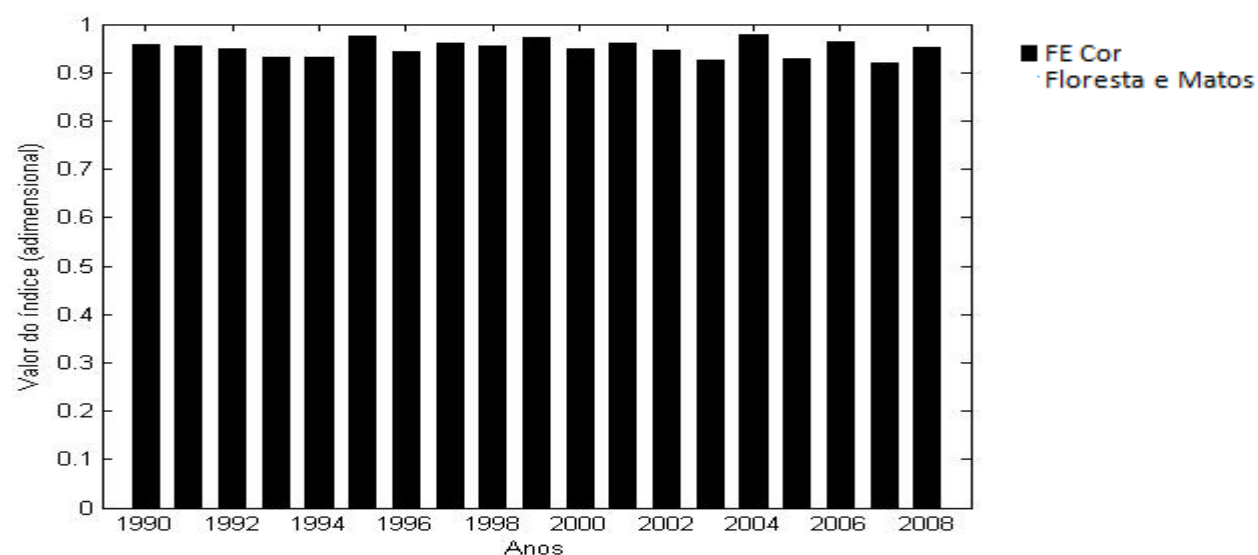


Figura 29 – Análise de sensibilidade das emissões de C_{OR} resultante dos fogos de vegetação, em Portugal Continental, entre 1990 e 2008.